

19 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

12 Offenlegungsschrift
10 DE 44 37 081 A 1

21 Aktenzeichen: P 44 37 081.4
22 Anmeldetag: 17. 10. 94
43 Offenlegungstag: 20. 4. 95

51 Int. Cl.⁶:
G 01 N 13/00
G 01 N 19/04
G 01 B 21/30
H 01 L 21/66
H 01 L 21/302
G 01 L 1/00
// H01J 37/28

DE 44 37 081 A 1

30 Unionspriorität: 32 33 31
18.10.93 JP P 5-259869

71 Anmelder:
Mitsubishi Denki K.K., Tokio/Tokyo, JP; Ryoden
Semiconductor System Engineering Corp., Itami,
Hyogo, JP

74 Vertreter:
Tiedtke, H., Dipl.-Ing.; Bühling, G., Dipl.-Chem.;
Kinne, R., Dipl.-Ing.; Pellmann, H., Dipl.-Ing.; Grams,
K., Dipl.-Ing.; Link, A., Dipl.-Biol. Dr., Pat.-Anwälte,
80336 München

72 Erfinder:
Yasue, Takao, Itami, Hyogo, JP; Nishioka, Tadashi,
Itami, Hyogo, JP

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

54 Gerät und Verfahren zur Adhäsionsmessung und Verfahren zum Herstellen von Halbleitervorrichtungen

57 Ein Adhäsionsmeßgerät enthält eine Meßvorrichtung für das Messen einer Kraftkurve an jedem von einer Vielzahl von Meßpunkten an einer Probenoberfläche mittels eines Auslegers, der an seinem freien Ende mit einem Fühler versehen ist, welcher aus einem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material besteht, und eine Verteilungsbilderzeugungseinrichtung zum Berechnen einer Adhäsion zwischen einem die Probenoberfläche bildenden Material und dem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material aus einem Ausgangssignal der Meßvorrichtung und zum Erzeugen eines Bildes der Adhäsionsverteilung an der Probenoberfläche. Ein Adhäsionsmeßverfahren umfaßt die Schritte zum Einstellen des Abstands zwischen einem Fühler, der an dem freien Ende eines Auslegers angebracht ist und aus einem auf eine Probenoberfläche aufzubringenden Material besteht, und der Probenoberfläche, um dadurch an jedem von einer Vielzahl von Meßpunkten an der Probenoberfläche eine Kraftkurve zu messen, Berechnen einer Adhäsion zwischen einem die Probenoberfläche bildenden Material und dem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material an jedem der Meßpunkte aus dem Ergebnis der Erfassung der Kraftkurve und Erzeugen eines Bildes der Adhäsionsverteilung an der Probenoberfläche aus der für jeden der Meßpunkte berechneten Adhäsion. Mit diesem Gerät und diesem Verfahren zur Adhäsionsmessung kann der Zustand der Probenoberfläche auf genaue Weise auf atomarem Niveau erfaßt werden.

DE 44 37 081 A 1

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

BUNDESDRUCKEREI 02. 95 508 016/596

27/33

Die Erfindung bezieht sich auf ein Gerät und ein Verfahren zum Messen der Adhäsionskraft einer Probenoberfläche. Ferner bezieht sich die Erfindung auf ein Verfahren zum Herstellen von Halbleitervorrichtungen unter Anwendung des Adhäsionsmeßverfahrens.

Ein herkömmliches Interatomarkraft-Mikroskop ist in Fig. 20 dargestellt. Ein von einem Halbleiterlaser 4 abgegebener Laserstrahl wird auf einer oberen Fläche eines Auslegers 1 fokussiert und ein von dem Ausleger 1 reflektierter Strahl fällt auf einen Photodiodendetektor 5. Der Photodiodendetektor 5 erfaßt eine Lageverschiebung des von dem Ausleger 1 reflektierten Strahls, um dadurch eine winzige Biegung des Auslegers 1 zu ermitteln, welche durch die interatomare Kraft verursacht wird, die zwischen einem an dem abliegenden Ende des Auslegers 1 angebrachten Meßfühler 2 und einer zu messenden Probe 3 wirkt.

Es wird nun der Vorgang zum Messen eines Bildes von Oberflächenungleichmäßigkeiten der Meßprobe 3 mittels eines solchen Interatomarkraft-Mikroskops beschrieben. Zuerst wird durch eine Steuereinheit 7 an eine Z-Elektrode eines zylindrischen piezoelektrischen Elements 6 eine Spannung zur Rückführungsregelung angelegt, wobei die Meßprobe 3 in der vertikalen Z-Richtung derart bewegt wird, daß der von dem Ausleger 1 reflektierte Strahl auf eine festgelegte Stelle an dem Photodiodendetektor 5 fällt. Während das zylindrische piezoelektrische Element 6 auf diese Weise unter Rückführungsregelung in der Z-Richtung gesteuert wird, werden durch einen Computer 8 über die Steuereinheit 7 an eine X-Elektrode und eine Y-Elektrode des zylindrischen piezoelektrischen Elements 6 Spannungen derart angelegt, daß die Meßprobe 3 gleichzeitig in der X-Richtung und der Y-Richtung abgetastet wird. Durch Erfassen der von der Steuereinheit 7 an das zylindrische piezoelektrische Element 6 jeweils für die X-Richtung, die Y-Richtung und die Z-Richtung angelegten Spannungen kann ein Bild von Ungleichförmigkeiten der Probenoberfläche erzeugt werden.

Gemäß der Beschreibung in der früher eingereichten japanischen Patentanmeldung Nr. 5-26841 wurde ein Verfahren zum Messen der Oberflächenadhäsion der Meßprobe 3 mittels des in Fig. 20 dargestellten Interatomarkraft-Mikroskops vorgeschlagen. Der hier verwendete Ausdruck "Oberflächenadhäsion" hat die Bedeutung einer Adhäsionskraft zwischen einem Material, das die Probenoberfläche bildet, und einem Material, das auf die Probenoberfläche aufzubringen ist. Die Oberflächenadhäsion wird beispielsweise dadurch gemessen, daß die Meßprobe 3 zum Ändern der Lage der Oberfläche der Meßprobe 3 in bezug auf den Meßfühler 2 vertikal bewegt wird und dabei eine Durchbiegung des Auslegers 1 in bezug auf eine Versetzung der Meßprobe 3 in der Z-Richtung ermittelt wird. Die Durchbiegung des Auslegers 1 in bezug auf die Versetzung der Meßprobe 3 in der Z-Richtung wird durch den Photodiodendetektor 5 als Ausmaß der Verschiebung der Einfallstelle gemessen, an welcher der von dem Ausleger 1 reflektierte Laserstrahl auf den Photodiodendetektor 5 auftrifft.

Im einzelnen wird die Oberflächenadhäsion in nachstehenden aufeinanderfolgenden Schritten S1 bis S7 gemessen:

S1: Zuerst wird der Meßfühler 2 zu einem Meßpunkt an der Meßprobe 3 bewegt.

S2: Es sei hier angenommen, daß eine Ausgangsspan-

nung des Photodiodendetektors 5 V_d ist und eine beliebig eingestellte Spannung V_s ist. Ein (nicht dargestellter) Schrittmotor für das Bewegen des zylindrischen piezoelektrischen Elements 6 in der Z-Richtung wird derart betrieben, daß die Meßprobe 3 näher an den Meßfühler 2 des Auslegers 1 herankommt.

S3: Wenn die Meßprobe 3 eine Lage nahe an dem Meßfühler 2 erreicht, wird durch die Steuereinheit 7 zum Bewegen des piezoelektrischen Elements 6 in der Z-Richtung eine Spannung an das piezoelektrische Element 6 angelegt, wodurch die Meßprobe 3 noch näher an dem Meßfühler 2 herankommt. Hierdurch entsteht eine zwischen der Meßprobe 3 und dem Meßfühler 2 wirkende interatomare Kraft für das Durchbiegen des Auslegers 1. Dadurch wird die Einfallstelle des Laserstrahls an den Photodiodendetektor 5 versetzt, wodurch sich die Ausgangsspannung V_d des Photodiodendetektors 5 ändert. Wenn die durch die Summe $V_d + V_s$ aus der Ausgangsspannung V_d und der eingestellten Spannung V_s dargestellte Versetzungsspannung zu Null wird, wird in der Steuereinheit 7 eine Rückführungsschaltung eingeschaltet, um zur automatischen Regelung in der Weise, daß die Versetzungsspannung auf Null gehalten wird, aus der Steuereinheit 7 an die Z-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 eine Spannung V_z anzulegen. Die bei einer derartigen Rückführungslage angelegte Spannung V_z wird als V_c angenommen.

S4: Die Rückführungsschaltung in der Steuereinheit 7 wird abgeschaltet.

S5: An die Z-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 wird zusätzlich eine Dreieckwellenspannung von ± 160 V mit der anliegenden Spannung V_c als Mitte angelegt, um die Meßprobe 3 in der Z-Richtung aufwärts und abwärts zu bewegen. Die dabei durch den Photodiodendetektor 5 gemessene Biegung des Auslegers 1 in bezug auf die Versetzung der Meßprobe 3 in der Z-Richtung wird durch einen Wert der Ausgangsspannung des Photodiodendetektors 5 erfaßt. Die graphische Darstellung der Abhängigkeit der Versetzungsspannung $V_d + V_s$ von der an das piezoelektrische Element angelegten Spannung V_z wird als Kraftkurve bezeichnet.

S6: Die Rückführungsschaltung in der Steuereinheit 7 wird wieder eingeschaltet, um die Meßprobe 3 in der Z-Richtung in die ursprüngliche Rückführungslage bzw. Regellage zu bewegen.

S7: Die vorstehend beschriebenen Schritte S1 bis S6 werden für einen Meßpunkt mehrmals wiederholt.

Die auf die vorstehend beschriebene Weise erhaltene Kraftkurve ist in Fig. 21 dargestellt. Die Lagen des Auslegers 1 an Punkten A bis G der Kraftkurve nach Fig. 21 sind jeweils in Fig. 22A bis 22G gezeigt. In Fig. 21 stellt die vertikale Achse die Versetzungsspannung $V_d + V_s$, nämlich die zwischen dem Fühler 2 und der Meßprobe 3 wirkende Kraft F dar. An einer bestimmten Stelle in der Richtung der vertikalen Achse gilt $F = 0$. In einem in der Richtung der vertikalen Achse von $F = 0$ weg positiven Bereich entsteht eine Abstoßung, wogegen in einem in Richtung der vertikalen Achse von $F = 0$ weg negativen Bereich eine Anziehung entsteht. Je größer der Abstand von der geraden Linie für $F = 0$ ist, umso stärker ist die jeweilige Kraft. Andererseits stellt die horizontale Achse die an die Z-Elektrode des zylindrischen piezoelektrischen Elements 6 angelegte Spannung V_z dar. Wenn sich ein Punkt an der Kurve nach links gemäß Fig. 21 bewegt, kommen die Meßprobe 3 und der Fühler 2 des Auslegers 1 einander näher.

Zuerst wirkt gemäß Fig. 22A an dem Punkt A auf der

geraden Linie für $F = 0$ keine Kraft zwischen dem Ausleger 1 und der Meßprobe 3. Wenn die an das piezoelektrische Element 16 angelegte Spannung V_z allmählich erhöht wird, um die Meßprobe 3 näher an den Ausleger 1 heranzubringen, wirkt an dem Punkt B nach Fig. 21 an dem Ausleger 1 plötzlich eine Anziehungskraft, da der Fühler 2 von einer Schicht von Schmutzstoffen wie Feuchtigkeit auf der Oberfläche der Meßprobe 3, nämlich von einer sogenannten Schmutzschicht 3a adsorbiert wird. Daher kommt gemäß Fig. 22B der Fühler 2 des Auslegers 1 in eine der Meßprobe 3 am nächsten kommende Lage. Wenn die Meßprobe 3 weiter in der Z-Richtung angehoben wird, wird die zwischen dem Fühler 2 und der Meßprobe 3 wirkende Anziehungskraft verringert, was $F = 0$ an dem Punkt C ergibt. Danach wirkt zwischen dem Fühler 2 und der Meßprobe 3 eine Abstoßungskraft. Somit wird gemäß Fig. 22C die Verbiegung des Auslegers 1 an dem Punkt C aufgehoben und dann der Ausleger 1 gemäß Fig. 22D an dem Punkt D in der Richtung zum Trennen des Fühlers 2 von der Meßprobe 3 gebogen.

Wenn unter diesen Umständen die an das piezoelektrische Element 6 angelegte Spannung V_c nunmehr allmählich verringert wird, um die Meßprobe 3 weiter von dem Ausleger 1 wegzubringen, wird auch dementsprechend die Abstoßungskraft verringert, wodurch sich $F = 0$ an dem Punkt E ergibt, an welchen gemäß Fig. 22E die Biegung des Auslegers 1 wegfällt. Wenn die Meßprobe 3 noch weiter von dem Fühler 2 weg versetzt wird, wirkt zwischen den beiden Teilen eine Anziehungskraft. Die Anziehungskraft wird allmählich größer, wodurch gemäß Fig. 22F der Ausleger 1 zu der Meßprobe 3 hin gebogen wird. Bei dem Erreichen des Punktes F tritt jedoch ein plötzlicher Sprung aus dem Anziehungsbereich zu dem Punkt G auf, woraufhin sich der Fühler 2 des Auslegers 1 von der Schmutzschicht 3a an der Meßprobe 3 löst, so daß der Ausleger 1 gemäß Fig. 22G eine im wesentlichen von jeglicher Biegung freie geradlinige Form annimmt.

Aufgrund der Biegung des Auslegers 1, die der zwischen dem Punkt E für $F = 0$ und dem Punkt F der auf die vorstehend beschriebene Weise erhaltenen Kraftkurve auftretenden Änderung V_z der an das piezoelektrische Element 6 angelegten Spannung V_z entspricht, wird die Oberflächenadhäsion zwischen der Meßprobe 3 und dem Fühler 2 quantitativ nach folgender Gleichung gemessen:

Oberflächenadhäsion = Federkonstante \times Auslegerbiegung.

Da die Kraftkurve die zwischen Atomen an der Oberfläche des Fühlers 2 und Atomen an der Oberfläche der Meßprobe 3 wirkende interatomare Kraft darstellt, ist die sich ergebende Kraftkurve in Abhängigkeit von Materialien des Fühlers 2 und/oder der Meßprobe 3 unterschiedlich. In Jpn. J. Appl. Phys., Band 32 (1993) L295 sind beispielsweise zwei typische Kraftkurven C1 und C2 gemäß der Darstellung in Fig. 23 abgebildet, welche mittels des herkömmlichen Interatomkraft-Mikroskops gemessen wurden. Diese Kraftkurven C1 und C2 wurden dadurch erhalten, daß an der gleichen Probenoberfläche mittels zweier Fühler gemessen wurde, deren Oberflächen aus voneinander verschiedenen Materialien bestanden. Es ist ersichtlich, daß sich die Oberflächenadhäsion zwischen der Probe und dem Fühler in Abhängigkeit von Unterschieden hinsichtlich des Materials der Fühleroberfläche selbst bei gleicher Probe än-

dert.

Gemäß der vorstehenden Beschreibung wurde in der japanischen Patentanmeldung Nr. 5-26841 vorgeschlagen, die Oberflächenadhäsion zwischen einem Fühler 5 und einer Meßprobe durch Messen der Kraftkurve zu bestimmen. Während es aber der besondere Zweck des Interatomkraft-Mikroskops ist, zum dreidimensionalen Erfassen der Form der Probenoberfläche ein Bild von Oberflächenungleichmäßigkeiten zu erzeugen, wird die Oberflächenadhäsion nur als eine physikalische Größe in Betracht gezogen, die abhängig von einem Material der Probenoberfläche und einem Material des Fühlers bestimmt ist. Infolge dessen wurde bisher nur vorgeschlagen, die Kraftkurve an einem beliebigen Punkt 10 an der Oberfläche der Meßprobe zu messen, um dadurch die Oberflächenadhäsion zu bestimmen.

Wenn jedoch durch eine Anzahl von Prozessen, wie sie beispielsweise bei üblichen Halbleitervorrichtungen erforderlich sind, eine mehrschichtige Struktur gebildet wird, sind manchmal an der Oberfläche einer bestimmten Schicht infolge des vorangehenden Prozesses restliche Teilchen vorhanden. In einem solchen Fall kann zwar mit einem Bild von Oberflächenungleichmäßigkeiten die Form der Schichtoberfläche erfaßt werden, aber es kann nicht festgestellt werden, ob an der Oberfläche 15 Fremdstoffe von anderen Bestandteilelementen vorhanden sind oder nicht. Ferner ist auch wegen des Unterschieds hinsichtlich der Bestandteilelemente die Oberflächenadhäsion zwischen dem Bereich, an dem Restteilchen liegen, und dem Bereich unterschiedlich, an dem keine Restteilchen vorhanden sind. Demzufolge besteht die Gefahr, daß durch die Messung an nur einem einzigen Punkt die genaue Adhäsionskraft nicht ermittelt werden kann.

Somit treten bei dem Interatomkraft-Mikroskop und dem Adhäsionsmeßverfahren nach dem Stand der Technik Schwierigkeiten hinsichtlich des genauen Erfassens des Zustandes der Probenoberfläche auf atomarem Niveau auf.

Zum Lösen dieses bei dem Stand der Technik auftretenden Problems liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Gerät und ein Verfahren zur Adhäsionsmessung, mit denen der Zustand der Oberfläche einer Probe auf genaue Weise auf atomarem Niveau erfaßt werden kann, sowie ein Verfahren zum Herstellen von Halbleitervorrichtungen unter Anwendung des Adhäsionsmeßverfahrens zu schaffen.

Die Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einem Adhäsionsmeßgerät gemäß Patentanspruch 1, einem Adhäsionsmeßverfahren gemäß Patentanspruch 3 bzw. einem Verfahren zum Herstellen von Halbleitervorrichtungen gemäß Patentanspruch 13 gelöst.

Vorteilhafte Ausgestaltungen des erfindungsgemäßen Gerätes bzw. Verfahrens sind in den Unteransprüchen aufgeführt.

Die Erfindung wird nachstehend anhand von Ausführungsbeispielen unter Bezugnahme auf die Zeichnung näher erläutert.

Fig. 1 ist eine Darstellung eines Adhäsionsmeßgerätes gemäß einem ersten Ausführungsbeispiel der Erfindung.

Fig. 2 ist ein Zeitdiagramm, das die Funktion des ersten Ausführungsbeispiels veranschaulicht.

Fig. 3 ist eine Darstellung eines bei dem ersten Ausführungsbeispiel erzeugten Bildes von Oberflächenungleichmäßigkeiten eines InP-Halbleitersubstrats.

Fig. 4A und 4B sind jeweils eine Darstellung eines durch das erste Ausführungsbeispiel erzeugten Bildes

der Oberflächenadhäsion-Verteilung des InP-Halbleitersubstrates und eine Darstellung einer Skala für die Verteilung.

Fig. 5 ist eine Darstellung eines durch das erste Ausführungsbeispiel erzeugten Bildes von Oberflächenungleichmäßigkeiten eines InGaAsP-Halbleitersubstrates.

Fig. 6A und 6B sind jeweils eine Darstellung eines durch das erste Ausführungsbeispiel erzeugten Bildes der Oberflächenadhäsion-Verteilung des InGaAsP-Halbleitersubstrates und eine Darstellung einer Skala für die Verteilung.

Fig. 7 ist ein Zeitdiagramm, das die Funktion eines zweiten Ausführungsbeispiels der Erfindung veranschaulicht.

Fig. 8 ist ein Zeitdiagramm, das die Funktion eines dritten Ausführungsbeispiels der Erfindung veranschaulicht.

Fig. 9 ist ein Zeitdiagramm, das die Funktion eines vierten Ausführungsbeispiels der Erfindung veranschaulicht.

Fig. 10 ist ein Zeitdiagramm, das die Funktion eines fünften Ausführungsbeispiels der Erfindung veranschaulicht.

Fig. 11 ist eine Darstellung, die das Funktionsprinzip bei einem sechsten Ausführungsbeispiel der Erfindung veranschaulicht.

Fig. 12 ist eine graphische Darstellung von Kraftkurven, die an Meßpunkten A bis C nach Fig. 11 gemessen werden.

Fig. 13 ist ein Zeitdiagramm, das die Funktion des sechsten Ausführungsbeispiels der Erfindung veranschaulicht.

Fig. 14 ist eine Darstellung, die ein Prüfungsverfahren gemäß einem siebenten Ausführungsbeispiel der Erfindung veranschaulicht.

Fig. 15 ist eine Schnittansicht einer gemäß dem siebenten Ausführungsbeispiel zu untersuchenden Halbleitervorrichtung.

Fig. 16 ist eine Schnittansicht einer gerade gemäß dem siebenten Ausführungsbeispiel untersuchten Halbleitervorrichtung.

Fig. 17 ist eine Schnittansicht der Halbleitervorrichtung, die nach der Untersuchung gemäß dem siebenten Ausführungsbeispiel einem nächsten Herstellungsschritt unterzogen wurde.

Fig. 18 ist eine Schnittansicht der Halbleitervorrichtung, die nach der Untersuchung gemäß dem siebenten Ausführungsbeispiel einem weiteren Herstellungsschritt unterzogen wurde.

Fig. 19 ist eine Schnittansicht der Halbleitervorrichtung, die nach der Untersuchung gemäß dem siebenten Ausführungsbeispiel noch einem weiteren Herstellungsschritt unterzogen wurde.

Fig. 20 ist eine Blockdarstellung eines herkömmlichen Interatomarkraft-Mikroskops.

Fig. 21 ist eine graphische Darstellung einer mittels des herkömmlichen Interatomarkraft-Mikroskops gemessenen Kraftkurve.

Fig. 22A bis 22G sind jeweils Seitenansichten eines Auslegers an Punkten A bis G nach Fig. 21.

Fig. 23 ist eine graphische Darstellung von typischen Kraftkurven, die mit dem herkömmlichen Interatomarkraft-Mikroskop gemessen wurden.

Erstes Ausführungsbeispiel

Die Fig. 1 zeigt die Gestaltung eines Adhäsionsmeßgerätes gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel der Er-

findung. Unterhalb eines Halbleiterlasers 4 ist ein Ausleger 1 angeordnet, unter dem ein zylindrisches piezoelektrisches Element 6 angeordnet ist. Oberhalb des Auslegers 1 ist ein Photodiodendetektor 5 angeordnet an den eine Steuerschaltung 70 für das Auslenken des piezoelektrischen Elements 6 in X-Richtung, Y-Richtung und Z-Richtung angeschlossen ist. An die Steuerschaltung 70 ist über A/D-Umsetzer 73 und 75 und D/A-Umsetzer 74 und 76 ein Computer 71 angeschlossen, an welchem ein Plattenspeicher 72 angeschlossen ist. An dem freien Ende des Auslegers 1 ist ein Fühler 2 aus einem Material angebracht, welches auf die Oberfläche einer Probe 3 aufgebracht werden soll und an welchen eine Adhäsion zu der Probenoberfläche gemessen werden soll.

Die Steuerschaltung 70 enthält ein Filter 9, das an den Ausgang des Photodiodendetektors 5 angeschlossen ist. An das Filter 9 ist über Schalter 15 und 16 ein Differenzverstärker 10 angeschlossen. An den Differenzverstärker 10 sind ferner parallel eine Integral-Verstärkerschaltung 11 und eine Proportional-Verstärkerschaltung 12 angeschlossen, an deren Ausgänge ein Addierer 13 angeschlossen ist. Der Ausgang des Addierers 13 ist mit einem Ausgangsanschluß T1 für ein Interatomarkraft-Mikroskopbildsignal und ferner über einen Hochspannungsverstärker 14a mit einer Z-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 verbunden. Mit dem Eingang des Hochspannungsverstärkers 14a ist ein Eingangsanschluß T2 verbunden, über den aus dem Computer 71 über den D/A-Umsetzer 74 eine Z-Ansteuerungs-Dreieckwellenspannung angelegt wird. Die Steuerschaltung 70 enthält ferner einen Hochspannungsverstärker 14b für das jeweilige Anlegen einer X-Ablenkspannung und einer Y-Ablenkspannung an eine X-Elektrode bzw. eine Y-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 entsprechend Befehlen aus dem Computer 71.

Die Funktion dieses Adhäsionsmeßgerätes für das Messen von Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten ist grundlegend der Funktion des vorangehend beschriebenen herkömmlichen Interatomarkraft-Mikroskops gleichartig. Zuerst wird in der Steuerschaltung 70 nach Fig. 1 der Schalter 15 eingeschaltet und der Schalter 16 ausgeschaltet. Ein von dem Halbleiterlaser 4 abgegebener Laserstrahl wird auf die obere Fläche des Auslegers 1 aufgestrahlt und ein von dem Ausleger 1 reflektierter Strahl trifft auf den Photodiodendetektor 5. Der Photodiodendetektor 5 erfaßt eine Lageverschiebung des von dem Ausleger 1 reflektierten Strahls, um dadurch eine winzige Verbiegung des Auslegers 1 zu ermitteln, die durch die interatomare Kraft verursacht ist, welche zwischen einer an dem piezoelektrischen Element 6 festgelegten zu messenden Probe 3 und einem Fühler 2 wirkt, der an dem freien Ende des Auslegers 1 angebracht ist. Ein Ausgangssignal des Photodiodendetektors 5 wird in der Steuerschaltung 70 über das Filter 9 zu dem Differenzverstärker 10 übertragen und durch diesen mit einer Bezugsspannung verglichen, die dem Differenzverstärker 10 über den D/A-Umsetzer 76 aus dem Computer 71 zugeführt wird. Das Ausgangssignal des Differenzverstärkers 10 wird durch die Integral-Verstärkerschaltung 11 und die Proportional-Verstärkerschaltung 12 verstärkt und deren jeweilige Ausgangssignale werden durch den nachgeschalteten Addierer 13 addiert. Die Spannung des Ausgangssignals des Addierers 13 wird durch den Hochspannungsverstärker 14a weiter erhöht und das sich ergebende Signal wird als Z-Richtung-Steuerspannung an die Z-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 angelegt. Auf diese Weise wird eine Rückkopplungsschleife gebildet.

Über die Rückkopplungsschleife wird die Lage der Probe 3 in Z-Richtung derart geregelt, daß der Ausgangspegel des Photodiodendetektors 5 konstant gehalten wird. Aus dem an den Ausgang des Addierers 13 angeschlossenen Ausgangsanschluß T1 werden über den A/D-Umsetzer 73 in den Computer 71 Daten für ein Ungleichmäßigkeitsbild aufgenommen.

Es wird nun ein Vorgang für das Messen einer Kraftkurve zum Bestimmen einer Oberflächenadhäsion beschrieben. Hierbei hat der Ausdruck "Oberflächenadhäsion" die Bedeutung einer Adhäsionskraft zwischen einem die Probenoberfläche bildenden Material und einem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material. Zuerst wird zum Öffnen der Rückkopplungsschleife in der Steuerschaltung 70 der Schalter 15 ausgeschaltet und der Schalter 16 eingeschaltet. Dann wird die an den Differenzverstärker 10 angelegte Bezugsspannung auf 0 V eingestellt, so daß die Ausgangsspannung des Differenzverstärkers 10 zu 0 V wird. Infolge dessen hält das Ausgangssignal des Addierers 13 die Spannung fest, die entwickelt wurde, bevor die Rückkopplungsschleife geöffnet wurde. Das heißt, es wird der relative Abstand zwischen der Oberfläche der Meßprobe 3 und dem Fühler an dem freien Ende des Auslegers 1 festgelegt. Unter diesen Bedingungen wird aus dem Computer 71 über den D/A-Umsetzer 74, den Eingangsanschluß T2 und den Hochspannungsverstärker 14a an die Z-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung angelegt. Aufgrund der an das piezoelektrische Element 6 angelegten Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung und des zu diesem Zeitpunkt von dem Photodiodendetektor 5 abgegebenen Signals wird die Kraftkurve bezüglich eines Meßpunktes an der Oberfläche der Meßprobe 3 erhalten. Ein Verfahren zum Berechnen der Oberflächenadhäsion aus der Kraftkurve ist dem herkömmlichen Verfahren gleichartig, welches vorangehend unter Bezugnahme auf die Fig. 22A bis 22G beschrieben wurde.

Nach dem erfindungsgemäßen Adhäsionsmeßverfahren werden sowohl die Messung der Bilddaten für die Oberflächenungleichmäßigkeiten als auch die Messung der Kraftkurve für alle von einer Vielzahl von Meßpunkten ausgeführt, die auf der Oberfläche der Meßprobe 3 angesetzt sind. Daher ist der zeitliche Zusammenhang zwischen dem Vorgang zum Messen der Bilddaten für die Oberflächenungleichmäßigkeiten und dem Vorgang zum Messen der Kraftkurve, insbesondere die Zeitsteuerung wichtig, mit der die Rückkopplungsschleife geöffnet und geschlossen wird. Die Fig. 2 ist ein Zeitdiagramm für die Messung bei dem ersten Ausführungsbeispiel. In Fig. 2 stellt die vertikale Achse die an die Z-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 angelegte Spannung V_z dar und die horizontale Achse stellt die Zeit t dar.

Zuerst wird unter der Bedingung, daß die Rückkopplungsschleife geschlossen ist, um die interatomare Kraft zwischen dem Fühler 2 des Auslegers 1 und der Meßprobe 3 konstant zu halten, ein erster Meßpunkt P1 an der Oberfläche der Meßprobe 3 zu einer Stelle unterhalb des Fühlers 2 versetzt. Dann werden zu einem Zeitpunkt t1 Bilddaten für Ungleichmäßigkeiten der Oberfläche gemessen und die gemessenen Daten werden in dem Plattenspeicher 72 gespeichert. Danach wird zu einem Zeitpunkt t2 die Rückkopplungsschleife geöffnet und an das piezoelektrische Element 6 die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung mit beispielsweise einer Frequenz von 20 Hz und einer Amplitude von ± 160 V angelegt, um die Messung der Kraftkurve vorzu-

nehmen. Dabei wird die Probe über einen Bereich von ± 320 V in der Z-Richtung bewegt. Nach beendeter Messung der Kraftkurve wird zu einem Zeitpunkt t3 die Rückkopplungsschleife geschlossen und der Computer 71 berechnet aus der gemessenen Kraftkurve eine Oberflächenadhäsion, wobei das Rechenergebnis in dem Plattenspeicher 72 gespeichert wird. Es ist anzumerken, daß gemäß der vorangehenden Beschreibung in Zusammenhang mit dem Stand der Technik die Oberflächenadhäsion durch Multiplizieren der Federkonstante des Auslegers 1 mit der Biegung des Auslegers 1 berechnet wird. Nachdem die Oberflächenadhäsion berechnet worden ist, bewegt der Computer 71 die Meßprobe 3 in X-Richtung und Y-Richtung während einer Zeitdauer zwischen Zeitpunkten t4 und t5 derart, daß unter den Fühler 2 ein nächster zweiter Meßpunkt P2 an der Meßprobe 3 angeordnet wird. Darauf folgend werden zu einem Zeitpunkt t6 die Bilddaten für die Ungleichmäßigkeiten der Oberfläche für den zweiten Meßpunkt P2 erfaßt.

Auf gleiche Weise wird die vorstehende Ablauffolge wiederholt für alle innerhalb eines zu beobachtenden Oberflächenbereichs der Meßprobe 3 angesetzten Meßpunkte, beispielsweise für jeden von 64×64 oder 128×128 Punkten ausgeführt. Dann bildet der Computer 71 aus den an allen Meßpunkten erhaltenen Bilddaten für die Ungleichmäßigkeiten der Oberfläche ein Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten für den beobachteten Bereich und auch aus den an allen Meßpunkten erhaltenen Werten für die Oberflächenadhäsion ein Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung. Da das Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten und das Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung aufgrund der Daten erzeugt werden, die im wesentlichen zum gleichen Zeitpunkt von dem gleichen Meßpunkt aufgenommen werden, kann der Oberflächenzustand der Meßprobe 3 auf genaue Weise dadurch erfaßt werden, daß die beiden Bilder miteinander verglichen werden. Die Fig. 3 und 4A zeigen jeweils ein Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten und ein Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung für ein InP-Halbleitersubstrat, die nach dem Verfahren gemäß diesem ersten Ausführungsbeispiel erzeugt werden. Der hierbei verwendete Fühler besteht aus Siliziumnitrid (Si_3N_4). Das untersuchte InP-Halbleitersubstrat wurde einer Behandlung mit HBr und einem Waschen mit Wasser unterzogen und es verblieben an der Substratoberfläche Restteilchen. Der untersuchte Bereich war $440 \text{ nm} \times 440 \text{ nm}$ groß und die Anzahl von Meßpunkten betrug 64×64 . Die Oberflächenadhäsion an einem jeweiligen Punkt kann durch Bezugnahme auf eine in Fig. 4B dargestellte Skala aus dem in Fig. 4A dargestellten Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung erfaßt werden. Die maximale Höhe der restlichen Teilchen beträgt 7 nm und die Oberflächenspannung hat einen Minimalwert von $155,3 \times 10^{-8} \text{ N}$ und einen Maximalwert von $359,7 \times 10^{-8} \text{ N}$. Aus dem Vergleich zwischen dem Bild für die Oberflächenungleichmäßigkeiten und dem Bild für die Oberflächenadhäsion-Verteilung ist ersichtlich, daß die Oberflächenadhäsion in Bereichen, in denen Restteilchen vorhanden sind, ungefähr halb so groß ist wie diejenige in Bereichen, in denen keine Restteilchen vorhanden sind.

Die Fig. 5 und 6A zeigen jeweils ein nach dem Verfahren gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel erzeugtes Bild von Oberflächenungleichmäßigkeiten und ein nach dem Verfahren gemäß dem ersten Ausführungsbeispiel erzeugtes Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung für ein Resistmuster auf der Oberfläche eines

InGaAsP-Halbleitersubstrat, wobei verwendete Fühler 2 besteht gleichfalls aus Siliziumnitrid (Si_3N_4). Das Resistmuster ist ein Muster mit einer Dicke von 90 nm mit Linien und Abständen, die jeweils 100 nm breit sind. Der untersuchte Bereich beträgt $440 \text{ nm} \times 440 \text{ nm}$ und die Anzahl von Meßpunkten ist 64×64 . Aus dem in Fig. 6A dargestellten Bild für die Oberflächenadhäsion-Verteilung kann unter Bezugnahme auf eine in Fig. 6B dargestellte Skala die Oberflächenadhäsion an einem jeweiligen der Punkte erfaßt werden. Die Oberflächenspannung hat einen Minimalwert von $86,3 \times 10^{-8} \text{ N}$ und einen Maximalwert von $485,6 \times 10^{-8} \text{ N}$. Für diese Probe ist ersichtlich, daß die Oberflächenadhäsion in Resistbereichen 5- bis 6mal so stark ist wie die in den Untergrundbereichen des InGaAsP-Halbleitersubstrats. Somit ist die Adhäsion der Probenoberfläche in Abhängigkeit von den Materialien der Probe unterschiedlich.

Zweites Ausführungsbeispiel

Bei dem vorangehenden ersten Ausführungsbeispiel wird die Adhäsion unmittelbar nach dem Messen der Kraftkurve an jedem der Meßpunkte berechnet und das Rechenergebnis wird in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Die für das Berechnen der Adhäsion benötigte Zeit beträgt jedoch für jeden Meßpunkt ungefähr 50 ms. Daher ist allein für das Berechnen der Adhäsion dann, wenn beispielsweise die Adhäsion für alle 64×64 Meßpunkte berechnet wird, eine Gesamtzeit von ungefähr 3 Minuten und 30 Sekunden erforderlich. Wenn ein Bild für Oberflächenungleichmäßigkeiten erfaßt wird, ist hinsichtlich des Verhinderns von einer beeinträchtigenden Wirkung wie einem Driften der Probe eine für eine Ablauffolge der Messung erforderliche kürzere Zeitdauer vorteilhafter. Bei diesem zweiten Ausführungsbeispiel wird daher nach dem Erfassen der Kraftkurve an jedem Meßpunkt an der Oberfläche der Meßprobe 3 die Adhäsion nicht sofort berechnet, sondern es werden die Meßdaten für die Kraftkurve zunächst einmal alle in dem Plattenspeicher 72 gespeichert. Danach wird nach beendeter Messung für alle Meßpunkte die Adhäsion für alle Meßpunkte gemeinsam berechnet.

Die Fig. 7 ist ein Zeitdiagramm für die Messung gemäß dem zweiten Ausführungsbeispiel. Zuerst wird unter der Bedingung, daß die Rückkopplungsschleife geschlossen ist, um die interatomare Kraft zwischen dem Fühler 2 des Auslegers 1 und der Meßprobe 3 konstant zu halten, ein erster Meßpunkt P1 an der Oberfläche der Meßprobe 3 zu einer Stelle unterhalb des Fühlers 2 versetzt. Dann werden zu einem Zeitpunkt t1 Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten erfaßt und die erfaßten Daten in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Danach wird zu einem Zeitpunkt t2 die Rückkopplungsschleife geöffnet und es wird an das piezoelektrische Element 6 zum Ausführen der Erfassung der Kraftkurve die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung beispielsweise mit einer Frequenz von 20 Hz und einer Amplitude von 340 V angelegt. Nach beendeter Erfassung der Kraftkurve wird zu einem Zeitpunkt t3 die Rückkopplungsschleife geschlossen und der Computer 71 speichert die Meßdaten für die Kraftkurve in den Plattenspeicher 72 ein. Auf die Abspeicherung der Meßdaten für die Kraftkurve folgend bewegt der Computer 71 die Meßprobe 3 während des Zeitabschnitts zwischen Zeitpunkten t4 und t5 in X-Richtung und Y-Richtung derart, daß unter dem Fühler 2 ein nächster zweiter Meßpunkt P2 an der Meßprobe 3 angeordnet wird. Dar-

auf folgend werden zu einem Zeitpunkt t6 Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten an dem zweiten Meßpunkt P2 erfaßt.

Gleichermaßen wird die vorstehend beschriebene Ablauffolge für alle Meßpunkte wiederholt, die in einem zu untersuchenden Oberflächenbereich der Meßprobe 3 angesetzt sind, z. B. für jeden von 64×64 Punkten oder 128×128 Punkten. Wenn die Messung für alle Meßpunkte abgeschlossen ist, liest der Computer 71 die in dem Plattenspeicher 72 gespeicherten Meßdaten für die Kraftkurve für jeden der Meßpunkte aus und berechnet aus den Meßdaten eine Oberflächenadhäsion an einem jeweiligen Meßpunkt. Dann erzeugt der Computer 71 aus den berechneten Werten für die Oberflächenadhäsion ein Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung sowie auch aus den an allen Meßpunkten erhaltenen Bilddaten für die Oberflächenungleichmäßigkeiten ein Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten für den untersuchten Bereich.

Drittes Ausführungsbeispiel

Bei dem ersten Ausführungsbeispiel wird bei dem Erfassen der Kraftkurve an jedem Meßpunkt nur ein Zyklus der Dreieckswelle für die Z-Ansteuerung an das zylindrische piezoelektrische Element 6 angelegt. Falls jedoch aus der Kraftkurve die Oberflächenadhäsion nur in einem einzigen Zyklus bestimmt wird, besteht die Gefahr, daß bei dem Vorliegen von Störungen wie Vibrationen, Geräuschen und elektrischen Störungen die Oberflächenadhäsion nicht bestimmt werden kann. Bei diesem dritten Ausführungsbeispiel wird daher an das piezoelektrische Element 6 die Dreiecksspannung für die Z-Ansteuerung an jedem Meßpunkt aufeinanderfolgend in zwei Zyklen angelegt. Dies ermöglicht es, die Oberflächenadhäsion zuverlässiger zu bestimmen. Es ist anzumerken, daß die Anzahl von Zyklen der angelegten Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung nicht auf zwei begrenzt ist, sondern in Aufeinanderfolge drei oder mehr betragen kann.

Die Fig. 8 ist ein Zeitdiagramm für die Messung bei dem dritten Ausführungsbeispiel. Zuerst wird unter der Bedingung, daß die Rückkopplungsschleife geschlossen ist, um die interatomare Kraft zwischen dem Fühler 2 des Auslegers 1 und der Meßprobe 3 konstant zu halten, ein erster Meßpunkt P1 an der Oberfläche der Meßprobe 3 zu einer Stelle unterhalb des Fühlers 2 versetzt. Dann werden zu einem Zeitpunkt t1 Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten erfaßt und die Meßdaten in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Danach wird zu einem Zeitpunkt t2 die Rückkopplungsschleife geöffnet und zum Erfassen der Kraftkurve an das piezoelektrische Element 6 in zwei Zyklen die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung beispielsweise mit einer Frequenz von 20 Hz und einer Amplitude von t 160 V angelegt. Nach beendeter Erfassung der Kraftkurve wird zu einem Zeitpunkt t3 die Rückkopplungsschleife geschlossen und der Computer 71 berechnet aus jeder der beiden erfaßten Kraftkurven eine Oberflächenadhäsion. Die Rechenergebnisse werden gemittelt und der Mittelwert wird in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Nachdem die Oberflächenadhäsion berechnet worden ist, bewegt der Computer 71 in einem Zeitabschnitt zwischen Zeitpunkten t4 und t5 die Meßprobe 3 in X-Richtung und Y-Richtung derart, daß ein nächster zweiter Meßpunkt P2 an der Meßprobe 3 unter dem Fühler 2 angeordnet wird. Darauf folgend werden zu einem Zeitpunkt t6 die Bilddaten für Oberflächenun-

gleichmäßigkeiten für den zweiten Meßpunkt P2 erfaßt. Gleichermaßen wird die vorstehend beschriebene Ablauffolge für alle Meßpunkte wiederholt ausgeführt, die innerhalb eines zu untersuchenden Oberflächenbereichs der Meßprobe 3 angesetzt sind, z. B. für jeden von 64×64 Punkten oder 128×128 Punkten. Danach erzeugt der Computer 71 jeweils aus den Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten und den Rechenwerten für die Oberflächenadhäsion, die an allen Meßpunkten ermittelt werden, ein Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten und ein Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung.

Viertes Ausführungsbeispiel

Bei dem vorstehend beschriebenen ersten bis dritten Ausführungsbeispiel werden nach dem Bewegen der Meßprobe 3 in der Weise, daß ein neuer Meßpunkt unter den Fühler 2 gebracht wird, zuerst die Bilddaten für die Oberflächenungleichmäßigkeiten erfaßt. Falls jedoch die Bilddaten für die Oberflächenungleichmäßigkeiten unmittelbar nach dem Bewegen der Probe 3 eingelesen werden, besteht in Anbetracht der Stabilität der Interatomarkraft-Mikroskopie die Gefahr, daß die Zuverlässigkeit der Daten verringert ist. Bei diesem vierten Ausführungsbeispiel wird daher nach dem Bewegen der Probe 3 zuerst die Kraftkurve erfaßt und dann werden die Bilddaten für die Oberflächenungleichmäßigkeiten gemessen.

Die Fig. 9 ist ein Zeitdiagramm für die Messung bei dem vierten Ausführungsbeispiel. Zuerst wird unter der Bedingung, daß die Rückkopplungsschleife geschlossen ist, um die interatomare Kraft zwischen dem Fühler 2 des Auslegers 1 und der Meßprobe 3 konstant zu halten, ein erster Meßpunkt P1 an der Oberfläche der Meßprobe 3 zu einer Stelle unterhalb des Fühlers 2 versetzt. Dann wird zu einem Zeitpunkt t1 die Rückkopplungsschleife geöffnet und es wird zum Erfassen der Kraftkurve an das piezoelektrische Element 6 in zwei Zyklen die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung beispielsweise mit einer Frequenz von 20 Hz und einer Amplitude von ± 160 V angelegt. Nach beendeter Erfassung der Kraftkurve wird zu einem Zeitpunkt t2 die Rückkopplungsschleife geschlossen und von dem Computer 71 aus jeder der beiden erfaßten Kraftkurven eine Oberflächenadhäsion berechnet. Die Rechenergebnisse werden gemittelt und der Mittelwert wird in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Nachdem die Oberflächenadhäsion berechnet worden ist, erfaßt der Computer 71 zu einem Zeitpunkt t3 Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten und speichert die Meßdaten in den Plattenspeicher 72 ein. Danach wird in einem Zeitabschnitt zwischen Zeitpunkten t4 und t5 von dem Computer 71 die Meßprobe 3 in X-Richtung und Y-Richtung derart bewegt, daß ein nächster zweiter Meßpunkt P2 an der Meßprobe 3 in die Lage unter dem Fühler 2 gebracht wird. Darauf folgend wird die Rückkopplungsschleife geöffnet, um die Erfassung der Kraftkurve für den zweiten Meßpunkt P2 auszuführen.

Auf gleichartige Weise wird diese Ablauffolge für alle Meßpunkte wiederholt ausgeführt, die in einem zu untersuchenden Oberflächenbereich der Meßprobe 3 angesetzt sind, z. B. für jeden von 64×64 Punkten oder 128×128 Punkten. Danach erzeugt der Mikrocomputer 71 aus den Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten und den Rechenwerten für die Oberflächenadhäsion, die an allen Meßpunkten erhalten wurden, jeweils ein Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten und ein

Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung.

Fünftes Ausführungsbeispiel

Wenn bei diesem Ausführungsbeispiel die Oberflächenadhäsion bei dem Erfassen der Kraftkurve an irgendeinem Meßpunkt selbst dann nicht berechnet werden kann, wenn an das piezoelektrische Element 6 die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung in zwei Zyklen angelegt wird, wird die Meßprobe 3 nicht zu dem nächsten Meßpunkt bewegt, sondern an dem gleichen Meßpunkt an das piezoelektrische Element 6 wieder die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung angelegt. Dies ergibt eine höhere Zuverlässigkeit der Daten für die Oberflächenadhäsion.

Die Fig. 10 ist ein Zeitdiagramm der Messung bei dem fünften Ausführungsbeispiel. Zuerst wird unter der Bedingung, daß die Rückkopplungsschleife geschlossen ist, um die interatomare Kraft zwischen dem Fühler 2 des Auslegers 1 und der Meßprobe 3 konstant zu halten, ein erster Meßpunkt P1 an der Oberfläche der Meßprobe 3 zu einer Stelle unterhalb des Fühlers 2 versetzt. Dann werden zu einem Zeitpunkt t1 die Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten erfaßt und die erfaßten Daten werden in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Danach wird zu einem Zeitpunkt t2 die Rückkopplungsschleife geöffnet und es wird für das Erfassen der Kraftkurve an das piezoelektrische Element 6 in zwei Zyklen die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung beispielsweise mit einer Frequenz von 20 Hz und einer Amplitude von ± 160 V angelegt. Nach beendeter Erfassung der Kraftkurven wird zu einem Zeitpunkt t3 die Rückkopplungsschleife geschlossen und von dem Computer 71 wird aus jeder der beiden erfaßten Kraftkurven eine Oberflächenadhäsion berechnet. Die Rechenergebnisse werden gemittelt und der Mittelwert wird in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Wenn dabei die Oberflächenadhäsion nicht berechnet werden kann, wird zu einem Zeitpunkt t4 die Rückkopplungsschleife geöffnet und es wird für eine erneute Erfassung der Kraftkurve an das piezoelektrische Element 6 in zwei Zyklen die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung angelegt. Danach wird zu einem Zeitpunkt t5 die Rückkopplungsschleife geschlossen und von dem Computer 71 wird aus jeder der beiden erfaßten Kraftkurven eine Oberflächenadhäsion berechnet. Die Rechenergebnisse werden gemittelt und der Mittelwert wird in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Nachdem die Oberflächenadhäsion berechnet worden ist, wird in einem Zeitabschnitt zwischen Zeitpunkten t6 und t7 von dem Computer 71 die Meßprobe 3 in X-Richtung und Y-Richtung derart versetzt, daß ein nächster Meßpunkt P2 an der Meßprobe 3 unter den Fühler 2 gebracht wird. Darauf folgend werden die Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten für den zweiten Meßpunkt P2 erfaßt.

Auf gleichartige Weise wird die vorstehend beschriebene Ablauffolge für alle Meßpunkte wiederholt ausgeführt, die innerhalb eines zu untersuchenden Oberflächenbereichs der Meßprobe 3 angesetzt sind, z. B. für jeden von 64×64 Punkten oder 128×128 Punkten. Dann erzeugt der Computer 71 jeweils aus den Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten und den berechneten Werten für die Oberflächenadhäsion, die an allen Meßpunkten erhalten wurden, ein Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten und ein Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung.

Gemäß der Beschreibung in Zusammenhang mit dem ersten Ausführungsbeispiel wird bei der Messung der Kraftkurve die Rückkopplungsschleife zunächst einmal geöffnet und die an den Differenzverstärker 10 in der Steuerschaltung 70 angelegte Bezugsspannung wird auf 0 V eingestellt, so daß der relative Abstand zwischen der Oberfläche der Meßprobe 3 und dem Fühler an dem freien Ende des Auslegers 1 festgelegt wird. Im Gegensatz dazu ist das sechste Ausführungsbeispiel zu einer derartigen Steuerung bei der Messung der Kraftkurve gestaltet, daß eine absolute Lage der Oberfläche der Meßprobe 3 in bezug auf eine "Tunneleinheitsbasis" festgelegt gehalten wird.

Wenn die Rückkopplungsschleife geöffnet wird, um die Steuerspannung für die Z-Richtung festzulegen, wird stets eine absolute Lage der Oberfläche der Meßprobe 3 in bezug auf die Tunneleinheitsbasis festgelegt gehalten. Das heißt, daß gemäß Fig. 11 der relative Abstand zwischen dem Fühler des Auslegers 1 und der Oberfläche der Meßprobe 3 in Abhängigkeit von Meßpunkten A, B und C verändert ist. In diesem Fall ergibt das Erfassen der Kraftkurve an jedem der Meßpunkte A, B und C drei Kraftkurven, die gleiche Form und Größe haben, aber gegeneinander auf der horizontalen Achse in Richtung der Z-Versetzung verschoben sind. Infolge dessen wird auch bei dem Berechnen der Oberflächenadhäsion aus jeder der Kraftkurven für die Meßpunkte A, B, und C das gleiche Rechenergebnis erhalten. Das heißt, eine Verschiebung der Kraftkurve auf der horizontalen Achse führt zu keiner Auswirkung auf die Berechnung der Adhäsion zwischen dem Fühler 2 und der Oberfläche der Meßprobe 3.

Der Betriebsvorgang zum Messen der Kraftkurve bei dem sechsten Ausführungsbeispiel wird unter Bezugnahme auf die Schaltung nach Fig. 1 beschrieben. Zum Öffnen der Rückkopplungsschleife wird in der Steuerschaltung 70 ein Schalter 17 ausgeschaltet und ein Schalter 18 eingeschaltet, wodurch die Integral-Verstärkerschaltung 11 eine konstante Spannung abgibt. Dadurch wird eine absolute Lage der Oberfläche der Meßprobe 3 in bezug auf die Tunneleinheitsbasis festgelegt gehalten. Als nächstes wird nach dem Ausschalten des Schalters 15 und dem Einschalten des Schalters 16 an den Differenzverstärker 10 über den D/A-Umsetzer 76 statt der Bezugsspannung die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung des piezoelektrischen Elements 6 angelegt. Über den Differenzverstärker 10, die Proportional-Verstärkerschaltung 12, den Addierer 13 und den Hochspannungsverstärker 14a wird für die Messung der Kraftkurve die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung an die Z-Elektrode des piezoelektrischen Elements 6 angelegt.

Die Fig. 13 ist ein Zeitdiagramm für die Messung bei dem sechsten Ausführungsbeispiel. Zuerst wird unter der Bedingung, daß die Rückkopplungsschleife geschlossen ist, um die interatomare Kraft zwischen dem Fühler 2 des Auslegers 1 und der Meßprobe 3 konstant zu halten, ein erster Meßpunkt P1 an der Oberfläche der Meßprobe 3 zu einer Stelle unterhalb des Fühlers 2 bewegt. Dann werden zu einem Zeitpunkt t1 Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten gemessen und die gemessenen Daten werden in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Danach wird zu einem Zeitpunkt t2 die Rückkopplungsschleife geöffnet und die Steuerspannung für die Z-Richtung auf beispielsweise 10 V festgelegt. Dann wird zu einem Zeitpunkt t3 für das Erfassen

der Kraftkurve an das piezoelektrische Element 6 in zwei Zyklen die Dreieckwellenspannung für die Z-Ansteuerung beispielsweise mit einer Frequenz von 20 Hz und einer Amplitude von 340 V angelegt. Nach beendeter Erfassung der Kraftkurve wird zu einem Zeitpunkt t4 die Steuerspannung für die Z-Richtung wieder auf 10 V festgelegt. Dann wird zu einem Zeitpunkt t5 die Rückkopplungsschleife geschlossen und von dem Computer 71 aus jeder der beiden erfaßten Kraftkurven eine Oberflächenadhäsion berechnet. Die Rechenergebnisse werden gemittelt und der Mittelwert wird in den Plattenspeicher 72 eingespeichert. Nachdem die Oberflächenadhäsion berechnet worden ist, bewegt der Computer 71 während eines Zeitabschnitts zwischen Zeitpunkten t6 und t7 die Meßprobe 3 in X-Richtung und Y-Richtung derart, daß ein nächster zweiter Meßpunkt P2 an der Meßprobe 3 unter den Fühler 2 versetzt wird. Darauf folgend werden zu einem Zeitpunkt t8 die Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten für den zweiten Meßpunkt P2 erfaßt.

Diese Ablauffolge wird gleichermaßen für alle Meßpunkte wiederholt ausgeführt, die innerhalb eines zu untersuchenden Oberflächenbereichs der Meßprobe 3 angesetzt sind, z. B. für jeden von 64×64 Punkten oder 128×128 Punkten. Dann erzeugt der Computer 71 jeweils aus den Bilddaten für Oberflächenungleichmäßigkeiten und den berechneten Werten der Oberflächenadhäsion, die an allen Meßpunkten erhalten wurden, ein Bild der Oberflächenungleichmäßigkeiten und ein Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung.

Siebtentes Ausführungsbeispiel

Während bei dem vorstehend beschriebenen ersten bis sechsten Ausführungsbeispiel als Meßprobe 3 an dem zylindrischen piezoelektrischen Element 6 ein verhältnismäßig kleines Scheibchen angebracht wird, kann als Meßprobe statt des Scheibchens beispielsweise ein Halbleiterwafer verwendet werden. In diesem Fall kann das erfindungsgemäße Oberflächenmeßverfahren als "Inline"-Meßverfahren bei dem Halbleiterherstellungsprozeß angewandt werden.

Bei dem siebenten Ausführungsbeispiel wird gemäß Fig. 14 während des Prozesses zum Herstellen einer Halbleitervorrichtung ein Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung an der Oberfläche eines auf einem Halbleiterwafer 19 gebildeten Halbleiterelements 20 erfaßt, um zu prüfen, ob eine Oberflächenadhäsion über einem vorbestimmten Wert erreicht ist oder nicht. Das Bild der Oberflächenadhäsion-Verteilung wird dadurch gemessen, daß das Halbleiterelement 20 nahe an einen Fühler 2 an dem freien Ende eines Auslegers 1 eines Adhäsionsmeßgerätes gebracht wird. Dieses Adhäsionsmeßgerät ist gemäß der Darstellung in Fig. 1 derart gestaltet, daß ein Laserstrahl aus einem Halbleiterlaser 4 auf den Ausleger 1 gestrahlt wird und mittels eines Photodiodendetektors 5 eine Lageverschiebung eines von dem Ausleger 1 reflektierten Strahls erfaßt wird.

Hierbei hat das Halbleiterelement 20 beispielsweise im Schnitt einen in Fig. 15 dargestellten Aufbau. An dem Halbleiterwafer 19 ist jeweils ein Transistor mit einem Polysilizium-Gate 21, einem Gate-Isolierfilm 22, einer Source-Zone 23 und einer Drain-Zone 24 ausgebildet. Auf diesem Transistor sind ein Zwischenschicht-Isolierfilm 25 und eine metallische Leiterschicht 26 ausgebildet, die mit der Source-Zone 23 verbunden ist. Ferner ist auf der metallischen Leiterschicht 26 ein zweiter Zwischenschicht-Isolierfilm 27 ausgebildet, auf dem eine

zweite metallische Leiterschicht 28 gebildet ist.

In einem nachfolgenden Schritt wird die zweite metallische Leiterschicht 28 zu einem zweiten Leitermuster geformt. Vor diesem Schritt wird die Oberflächenadhäsion der zweiten metallischen Leiterschicht 28 folgendermaßen untersucht: Zuerst werden gemäß Fig. 16, der Ausleger 1 und der Fühler 2 des Adhäsionsmeßgerätes nahe an die Oberfläche der zweiten metallischen Leiterschicht 28 herangebracht, um nach einem der vorstehend bei dem ersten bis sechsten Ausführungsbeispiel beschriebenen Verfahren ein Bild der Oberflächenadhäsions-Verteilung zu erfassen.

Wenn aus dem Erfassungsergebnis festgestellt wird, daß eine Oberflächenadhäsion über einem vorbestimmten Wert erreicht ist, schreitet der Prozeß zu dem nächsten Schritt weiter. Im einzelnen wird gemäß Fig. 17 auf die zweite metallische Leiterschicht 28 ein Photoresist 29 aufgebracht und das Halbleiterelement wird belichtet, um den Photoresist 29 zu einem Muster gemäß Fig. 18 zu formen. Danach wird gemäß Fig. 19 die zweite metallische Leiterschicht 28 mit dem Photoresist 29 als Maske zu einem Muster geformt, wonach der Photoresist 29 entfernt wird. Dadurch wird das zweite Leitermuster gebildet.

Falls andererseits aus dem Ergebnis der Erfassung des Bildes der Oberflächenadhäsion-Verteilung festgestellt wird, daß die Oberflächenadhäsion über dem vorbestimmten Wert nicht erreicht ist, wird das Halbleiterplättchen in dem Zustand nach Fig. 15 als fehlerhaft bewertet und aus der Fertigungsstraße ausgeschieden. Dies geschieht deshalb, weil zwischen der zweiten metallischen Leiterschicht 28 und dem daran gebildeten Photoresist 29 ein Abblättern hervorgerufen wird, wenn nicht die Oberflächenadhäsion über dem vorbestimmten Wert erreicht ist.

Es kann ohne tatsächliches Aufbringen des Photoresists 29 auf die zweite metallische Leiterschicht 28 mit dem vorstehend beschriebenen Untersuchungsverfahren vorausgesagt werden, ob zwischen diesen ein Abblättern auftreten wird oder nicht. Daher kann die Halbleitervorrichtung mit hohem Wirkungsgrad hergestellt werden. Gleichermäßen ist es auch möglich, die Adhäsion zwischen der Oberfläche eines Materials eines Substrates, eines Isolierfilms, einer Leiterschicht, einer Elektroden-schicht und/oder einer Resistschicht, die eine Halbleitervorrichtung bilden, und einem als nächstes auf die Oberfläche des ersteren Materials aufzubringenden Material zu messen, um dadurch zu untersuchen, ob eine Oberflächenadhäsion über dem vorbestimmten Wert erreicht ist oder nicht. Es ist anzumerken, daß ein solcher Kontrollschritt entweder in die Fertigungsstraße für Halbleitervorrichtungen als "In-line"-Kontrolle eingegliedert oder als Schritt gesondert von der Fertigungsstraße ausgeführt werden kann.

Achtes Ausführungsbeispiel

Bei jedem der vorstehenden Ausführungsbeispiele wird zum Ablenken und Bewegen der Meßprobe 3 das zylindrische piezoelektrische Element 6 verwendet. Das piezoelektrische Element 6 ist jedoch nicht auf ein zylindrisches Element eingeschränkt und es können die gleichen Vorteile auch mittels eines piezoelektrischen Elements in Dreibeinausführung, Schichtenausführung oder Turmausführung erzielt werden.

Ein Adhäsionsmeßgerät enthält eine Meßvorrichtung für das Messen einer Kraftkurve an jedem von einer Vielzahl von Meßpunkten an einer Probenoberfläche

mittels eines Auslegers, der an seinem freien Ende mit einem Fühler versehen ist, welcher aus einem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material besteht, und eine Verteilungsbilderzeugungseinrichtung zum Berechnen einer Adhäsion zwischen einem die Probenoberfläche bildenden Material und dem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material aus einem Ausgangssignal der Meßvorrichtung und zum Erzeugen eines Bildes der Adhäsionsverteilung an der Probenoberfläche. Ein Adhäsionsmeßverfahren umfaßt die Schritte zum Einstellen des Abstands zwischen einem Fühler, der an dem freien Ende eines Auslegers angebracht ist und aus einem auf eine Probenoberfläche aufzubringenden Material besteht, und der Probenoberfläche, um dadurch an jedem von einer Vielzahl von Meßpunkten an der Probenoberfläche eine Kraftkurve zu messen, Berechnen einer Adhäsion zwischen einem die Probenoberfläche bildenden Material und dem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material an jedem der Meßpunkte aus dem Ergebnis der Erfassung der Kraftkurve und Erzeugen eines Bildes der Adhäsionsverteilung an der Probenoberfläche aus der für jeden der Meßpunkte berechneten Adhäsion. Mit diesem Gerät und diesem Verfahren zur Adhäsionsmessung kann der Zustand der Probenoberfläche auf genaue Weise auf atomarem Niveau erfaßt werden.

Patentansprüche

1. Adhäsionsmeßgerät, gekennzeichnet durch eine Meßvorrichtung (1 bis 6, 70) zum Messen einer Kraftkurve an jedem von einer Vielzahl von Meßpunkten an einer Probenoberfläche (3) mittels eines Auslegers (1), der an seinem freien Ende mit einem Fühler (2) versehen ist, welcher aus einem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material besteht, und eine Verteilungsbild-Erzeugungseinrichtung (71) zum Berechnen einer Adhäsion zwischen einem die Probenoberfläche bildenden Material und dem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material aus einem Ausgangssignal der Meßvorrichtung und zum Erzeugen eines Bildes der Adhäsionsverteilung auf der Probenoberfläche.
2. Adhäsionsmeßgerät nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßvorrichtung ein piezoelektrisches Element (6) zum Auflegen einer Probe (3), den Ausleger (1), der an seinem freien Ende mit dem Fühler (2) versehen ist, welcher aus dem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material besteht, eine Lasereinheit (4) zum Aufstrahlen eines Laserstrahls auf den Ausleger, einen Detektor (5) zum Erfassen eines von dem Ausleger reflektierten Laserstrahls und eine Steuerschaltung (70) aufweist, die zum Messen der Kraftkurve an jedem der Vielzahl der Meßpunkte an der Probenoberfläche eine Spannung an das piezoelektrische Element anlegt.
3. Adhäsionsmeßverfahren, dadurch gekennzeichnet, daß der Abstand zwischen einem Fühler, der an dem freien Ende eines Auslegers angebracht ist und aus einem auf eine Probenoberfläche aufzubringenden Material besteht, und der Probenoberfläche eingestellt wird, um dadurch an jedem von einer Vielzahl von Meßpunkten an der Probenober-

- fläche eine Kraftkurve zu n,
daß aus dem Ergebnis der Erfassung der Kraftkurve eine Adhäsion zwischen einem die Probenoberfläche bildenden Material und dem auf die Probenoberfläche aufzubringenden Material an jedem der Meßpunkte berechnet wird und
daß aus der für jeden der Meßpunkte berechneten Adhäsion ein Bild der Adhäsionsverteilung an der Probenoberfläche erzeugt wird.
4. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß an jedem der Meßpunkte an der Probenoberfläche Interatomarkraft-Mikroskop-Bilddaten erfaßt werden, während an dem gleichen Meßpunkt die Kraftkurve erfaßt wird, und daß aus den an jedem der Meßpunkte erfaßten Interatomarkraft-Mikroskop-Bilddaten ein dem Bild der Adhäsionsverteilung entsprechendes Interatomarkraft-Mikroskopbild der Probenoberfläche erzeugt wird.
5. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Interatomarkraft-Mikroskop-Bilddaten bei einem Zustand erfaßt werden, bei dem der Abstand zwischen dem Fühler und der Probenoberfläche festgelegt gehalten wird.
6. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß nach dem Erfassen der Interatomarkraft-Mikroskop-Bilddaten an einem der Meßpunkte eine Kraftkurve an dem gleichen Meßpunkt erfaßt wird und aus der erfaßten Kraftkurve eine Adhäsion an diesem Meßpunkt berechnet wird, wonach zu dem nächsten Meßpunkt fortgeschritten wird.
7. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Meßdaten für die Kraftkurve an jedem Meßpunkt gespeichert werden und nach beendeter Messung an allen Meßpunkten eine Adhäsion an dem jeweiligen Meßpunkt aus den gespeicherten Meßdaten berechnet wird.
8. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Kraftkurve an jedem der Meßpunkte mehrmals erfaßt wird.
9. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß die Kraftkurve an einem der Meßpunkte erfaßt wird und dann die Interatomarkraft-Mikroskop-Bilddaten erfaßt werden, wonach zu dem nächsten Meßpunkt fortgeschritten wird.
10. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Kraftkurve an einem der Meßpunkte zweimalig erfaßt wird und die Adhäsion an diesem Meßpunkt berechnet wird, wonach dann, wenn die Adhäsion berechenbar ist, sofort zu dem nächsten Meßpunkt fortgeschritten wird, oder aber dann, wenn die Adhäsion nicht berechnet werden kann, zu dem nächsten Meßpunkt fortgeschritten wird, nachdem erneut an dem gleichen Meßpunkt die Kraftkurve erfaßt und die Adhäsion berechnet wurde.
11. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Kraftkurve erfaßt wird, nachdem an jedem der Meßpunkte der Abstand zwischen dem Fühler und der Probenoberfläche auf einen vorbestimmten Wert eingestellt wurde.
12. Adhäsionsmeßverfahren nach Anspruch 3, dadurch gekennzeichnet, daß die Kraftkurve erfaßt wird, nachdem an jedem der Meßpunkte die abso-

- lute Lage der Probenoberfläche festgelegt wurde.
13. Verfahren zum Herstellen von Halbleitervorrichtungen, dadurch gekennzeichnet, daß in einem Prüfschritt eine Adhäsion zwischen der Oberfläche eines ersten Materials eines Substrates, eines Isolierfilmes, einer Leiterschicht, einer Elektrodenschicht und/oder einer Resistschicht, die eine Halbleitervorrichtung bilden, und einem auf die Oberfläche des ersten Materials aufzubringenden zweiten Material gemessen und ein Bild der Adhäsionsverteilung erzeugt wird und daß das zweite Material auf die Oberfläche des ersten Materials aufgebracht wird, wenn bei dem Prüfschritt festgestellt wird, daß die gemessene Adhäsion größer als ein vorbestimmter Wert ist.
14. Verfahren nach Anspruch 13, dadurch gekennzeichnet, daß bei dem Prüfschritt der Abstand zwischen einem Fühler, der an dem freien Ende eines Auslegers angebracht ist und der aus dem zweiten Material besteht, und der Oberfläche des ersten Materials eingestellt wird, um dadurch an jedem einer Vielzahl von Meßpunkten an der Oberfläche des ersten Materials eine Kraftkurve zu erfassen, aus dem Ergebnis der Erfassung der Kraftkurve an jedem der Meßpunkte eine Adhäsion zwischen dem ersten Material und dem zweiten Material berechnet wird und aus der für jeden der Meßpunkte berechneten Adhäsion ein Bild der Adhäsionsverteilung auf der Oberfläche des ersten Materials erzeugt wird.

Hierzu 17 Seite(n) Zeichnungen

- Leerseite -

FIG. 1

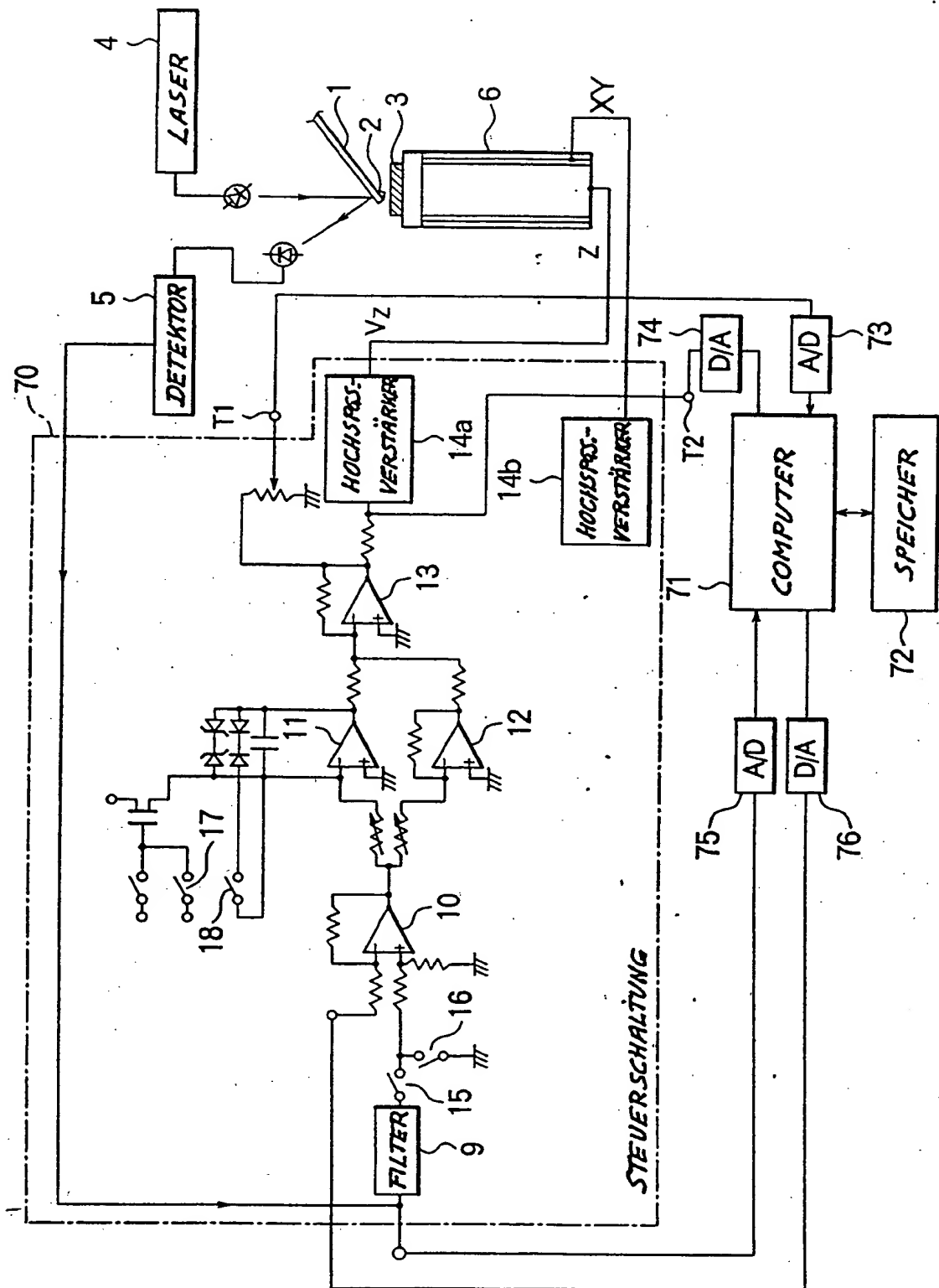


FIG. 2

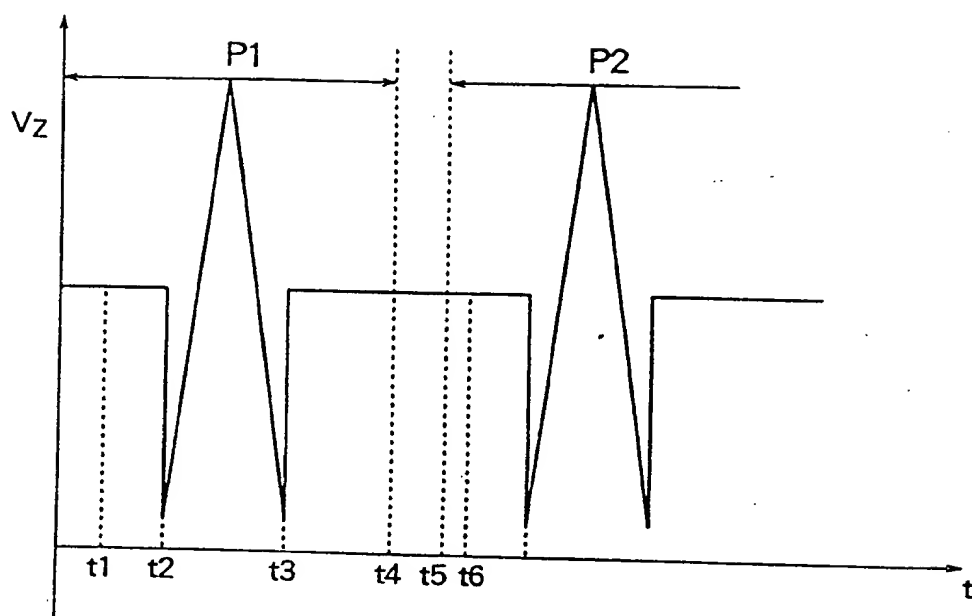


FIG. 3

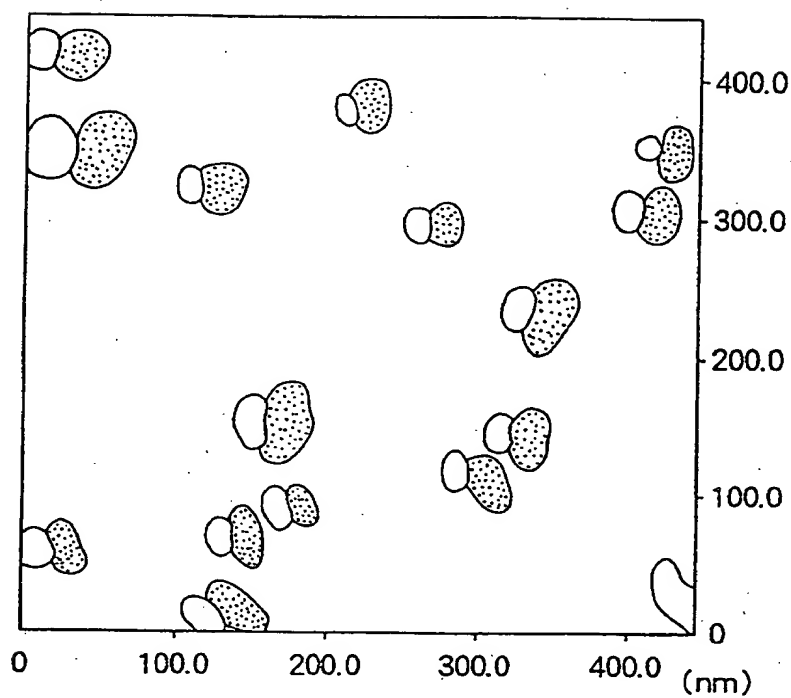


FIG. 4A

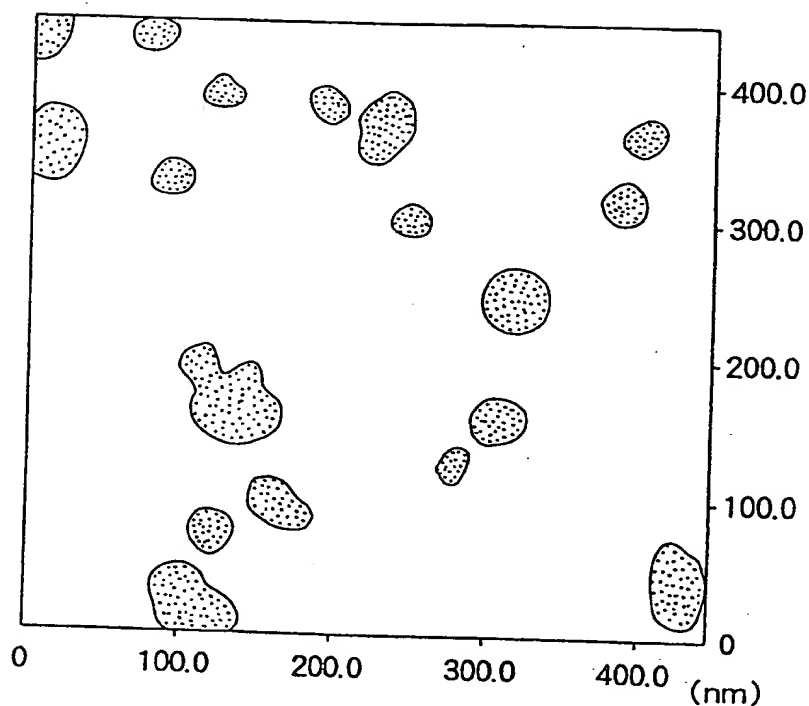


FIG. 4B

359.7×10^{-8}



$155.3 \times 10^{-8} \text{ N}$

FIG. 5

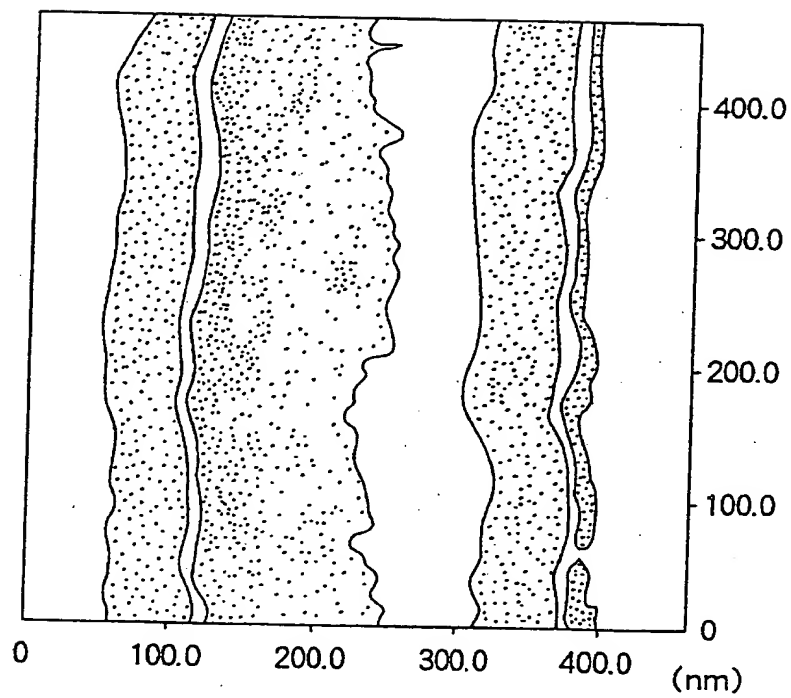


FIG. 6A

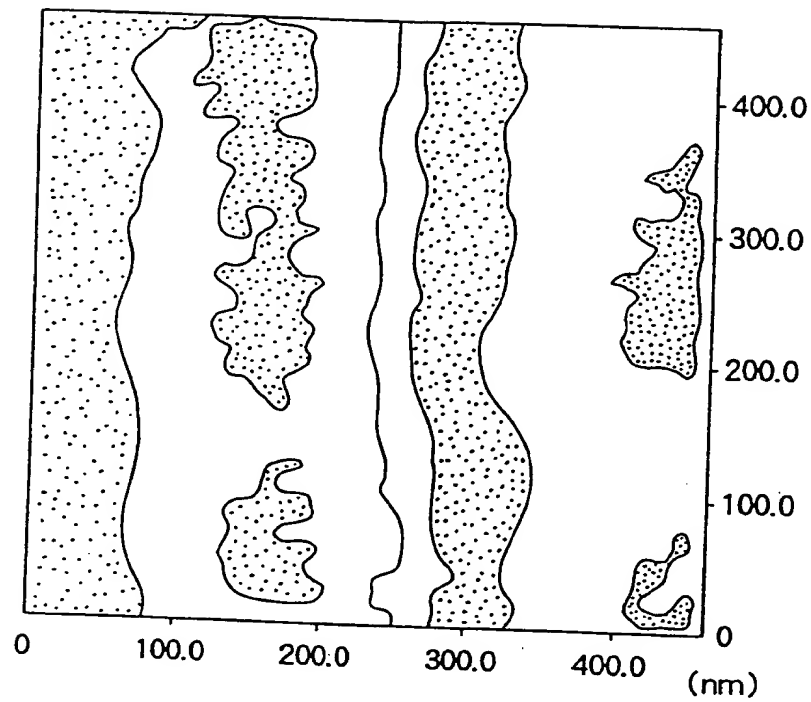


FIG. 6B

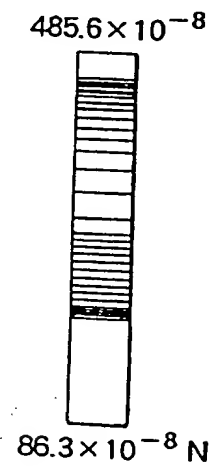


FIG. 7

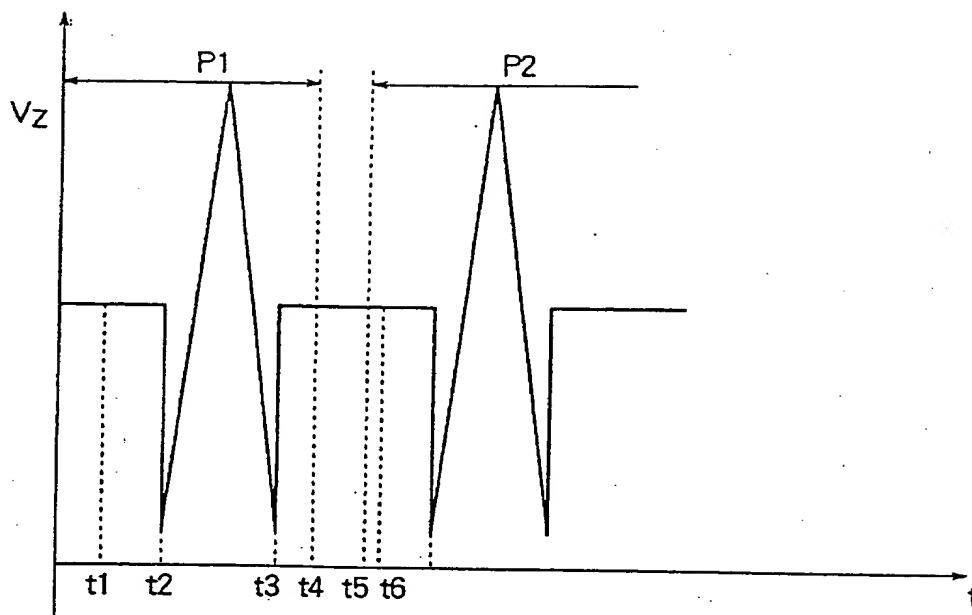


FIG. 8

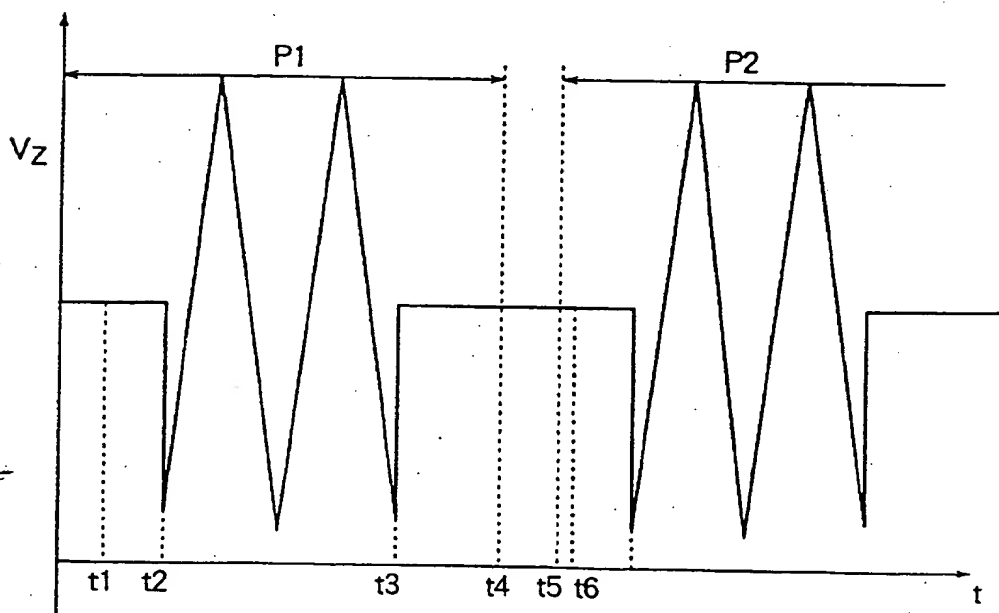


FIG. 9

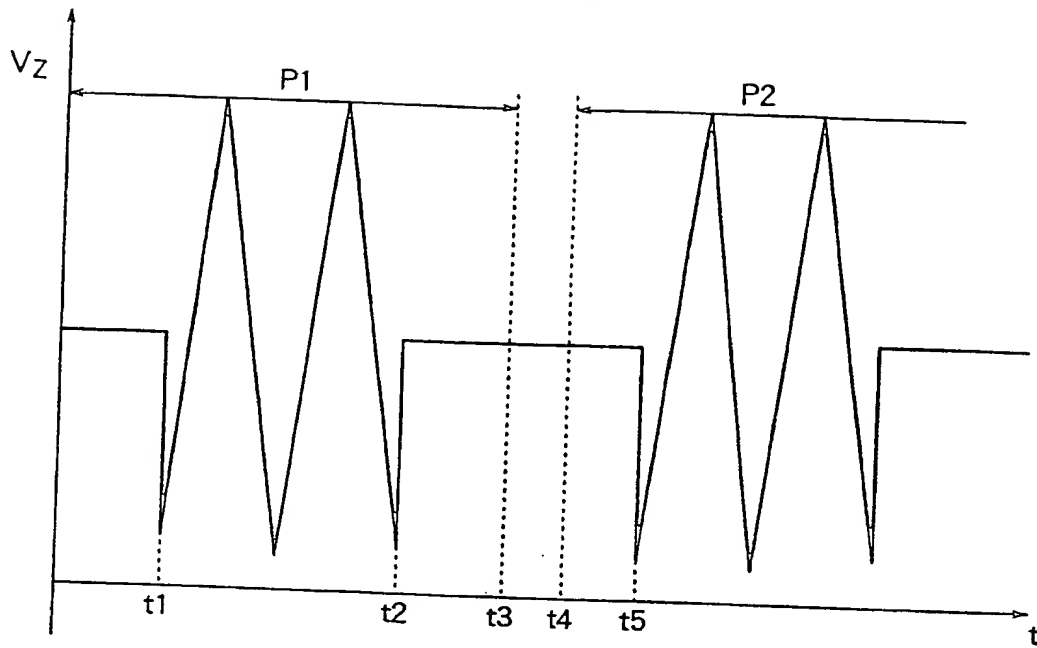


FIG. 10

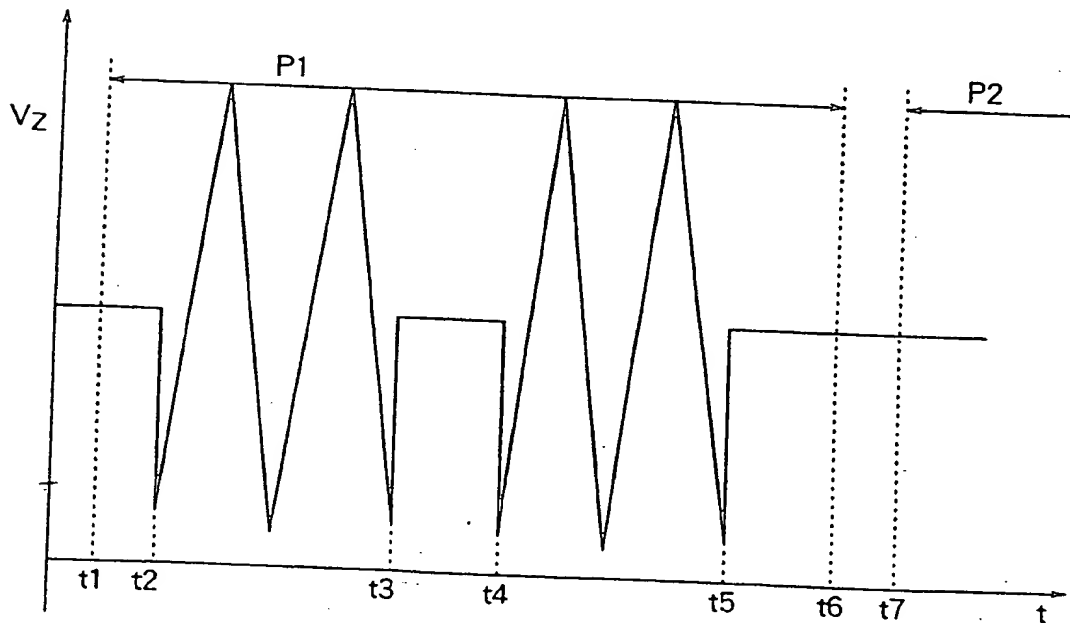


FIG. 11

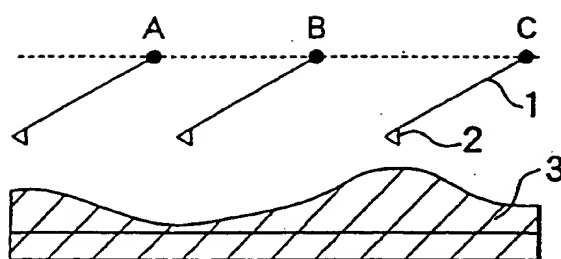


FIG. 12

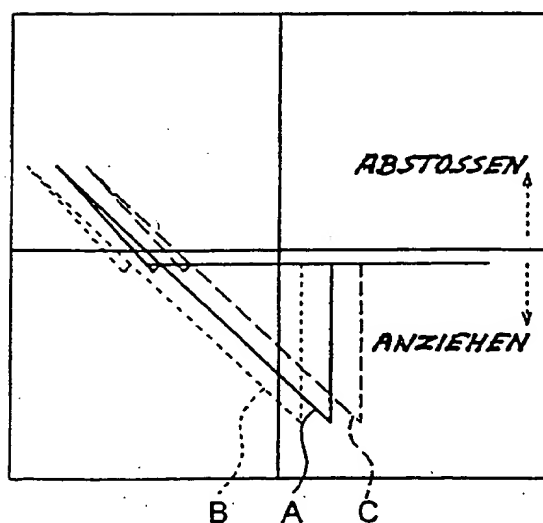


FIG. 13

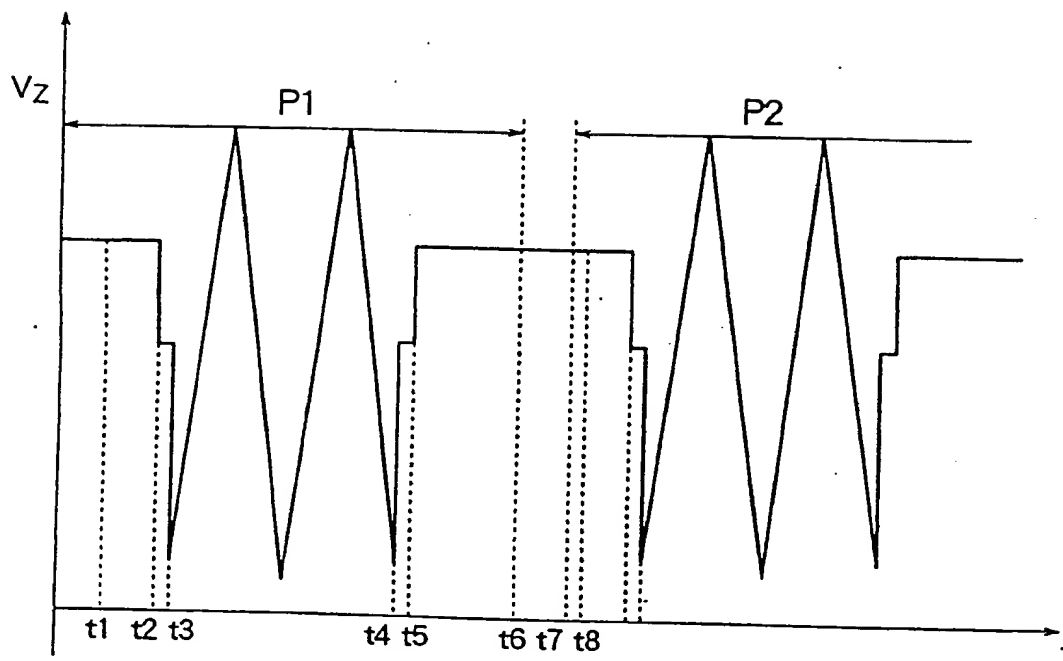


FIG. 14

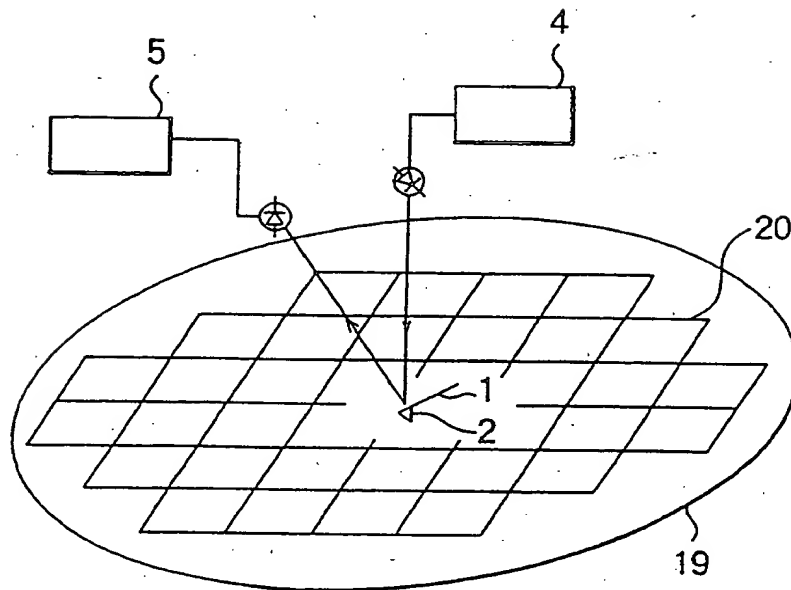


FIG. 15

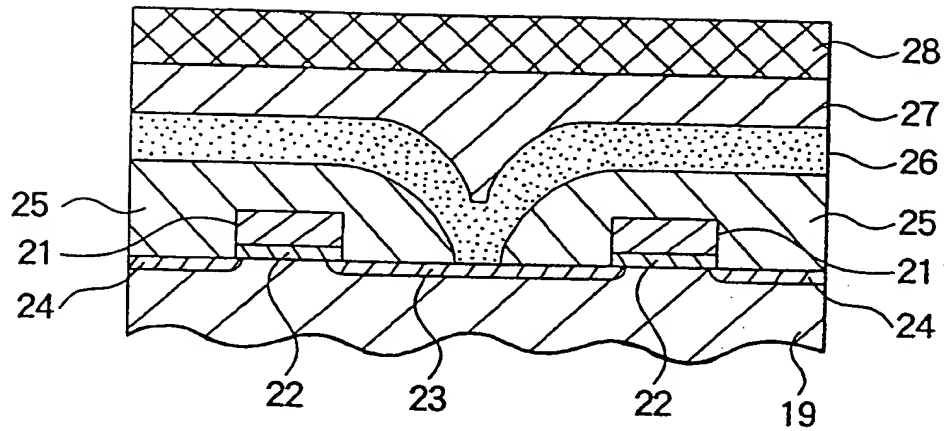


FIG. 16

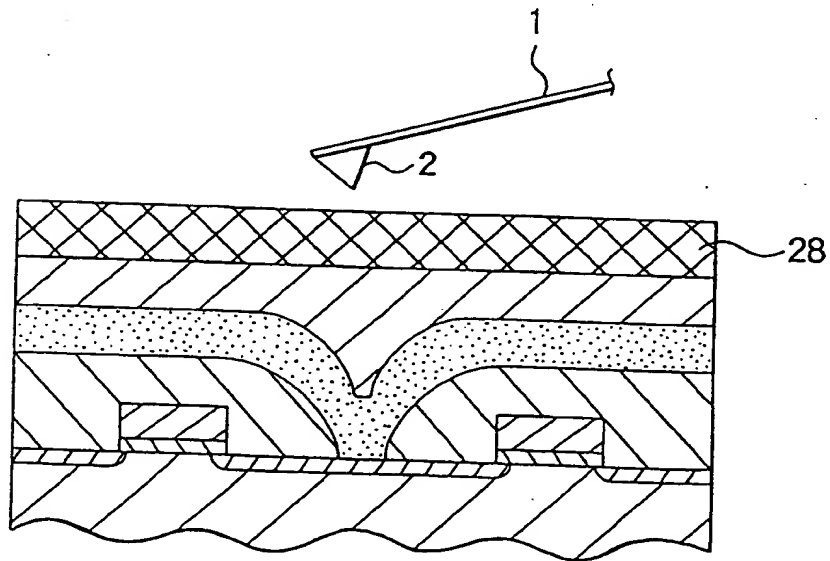


FIG. 17

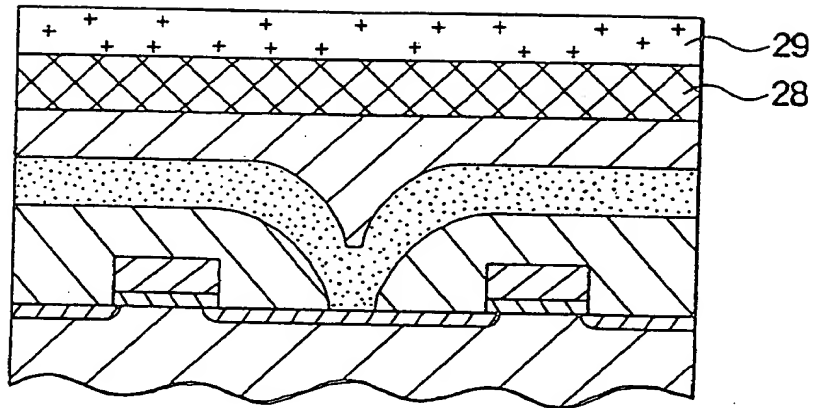


FIG. 18

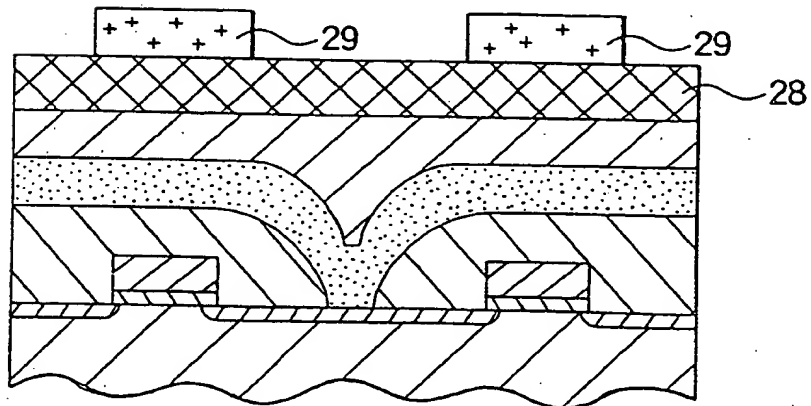


FIG. 19

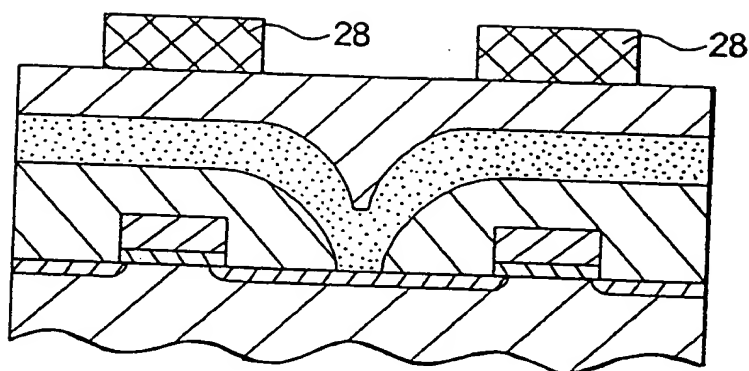


FIG. 20

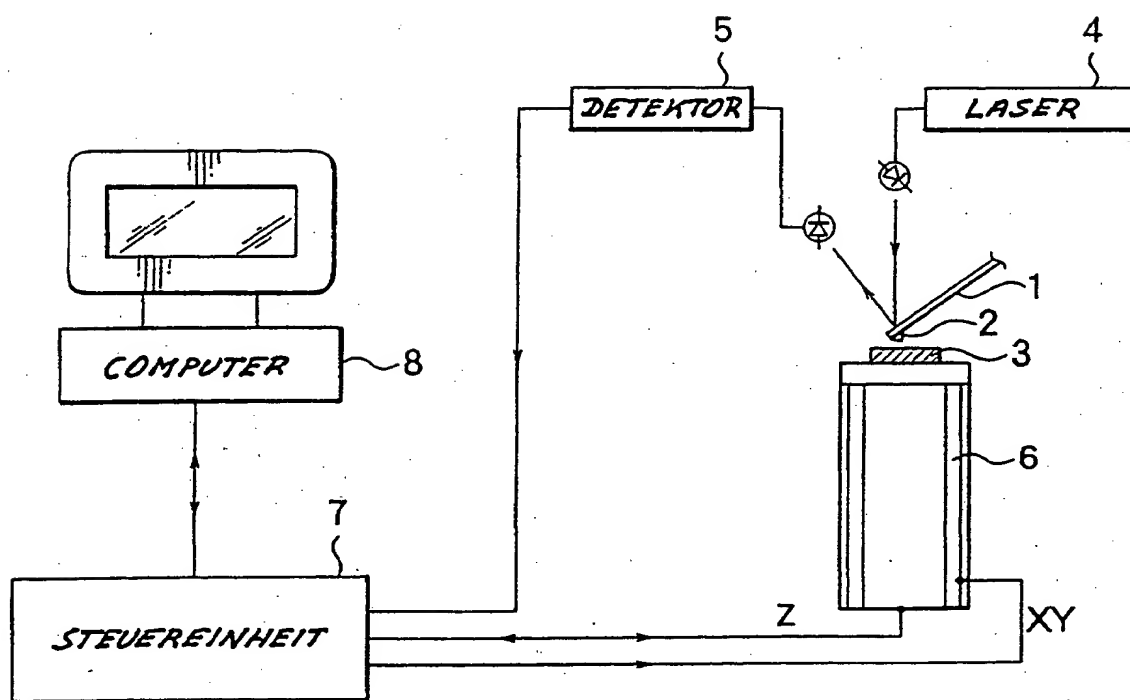


FIG. 21

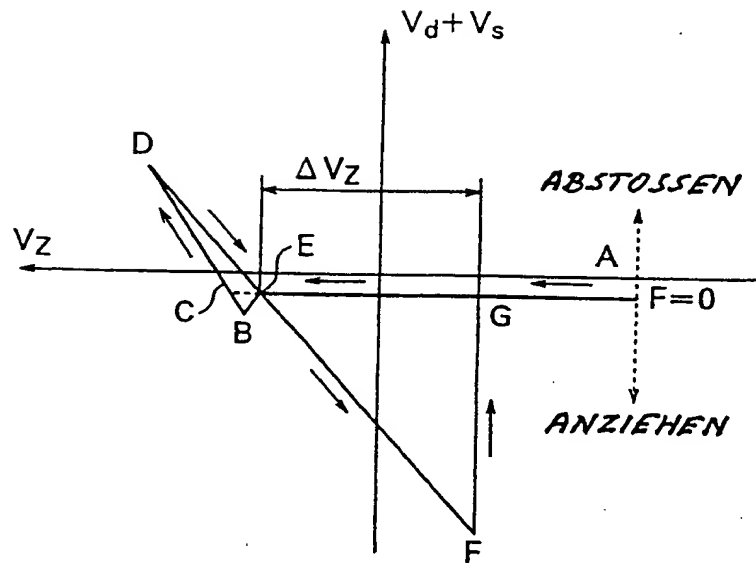


FIG. 22A

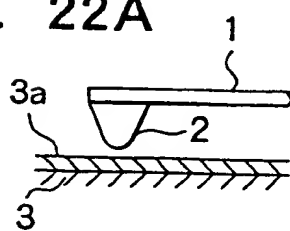


FIG. 22D

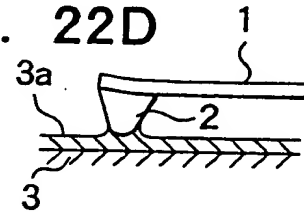


FIG. 22B

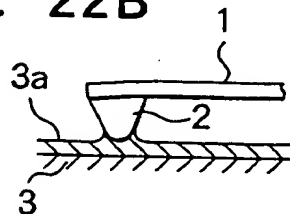


FIG. 22E

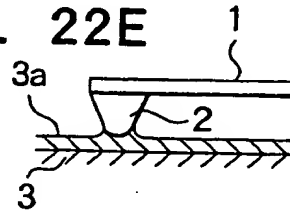


FIG. 22C

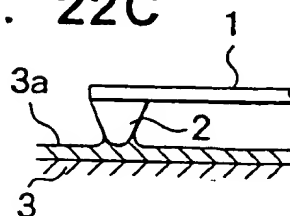


FIG. 22F

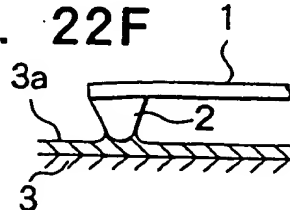


FIG. 22G

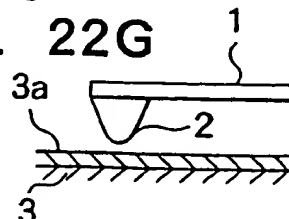


FIG. 23

